

L'interazione dei grandi scavi in sotterraneo con gli acquiferi

Original

L'interazione dei grandi scavi in sotterraneo con gli acquiferi / Marchionatti, Federico. - (2014).
[10.6092/polito/porto/2543958]

Availability:

This version is available at: 11583/2543958 since:

Publisher:

Politecnico di Torino

Published

DOI:10.6092/polito/porto/2543958

Terms of use:

Altro tipo di accesso

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

8.2.4.2. RETE DI CONTROLLO CHIMICO-FISICO DELLE ACQUE

Lo studio relativo alle caratteristiche chimico-fisiche delle acque sotterranee intercettate dai lavori di scavo delle gallerie della Cava “Franca” riguarda i dati ottenuti da analisi chimiche eseguite su una serie di campioni prelevati in periodi diversi provenienti dagli scarichi verso l’esterno e da venute in sottterraneo.

I campionamenti sono stati effettuati dal personale del Politecnico di Torino (Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture – DIATI), le analisi sono state eseguite presso il Laboratorio di Ricerche Idrogeologiche del DIATI. All’atto del campionamento, sulle acque, sono stati misurati parametri quali: temperatura, pH, conducibilità elettrica specifica e potenziale Redox (Eh). L’aliquota di campione prelevato per la determinazione dei metalli è stato acidificato con acido nitrico 65% dopo filtrazione su supporto da 0.45 µm.

I campioni prelevati si riferiscono ai due differenti settori della cava riguardanti gli accessi Est (E) e Ovest (W) sia per quanto riguarda gli scarichi che le venute e interessano anche le sorgenti descritte nel relativo paragrafo. Negli scarichi sono convogliate tutte le acque intercettate durante gli scavi, raccolte in appositi bacini realizzati in sottterraneo e trasportate in superficie attraverso una serie di tubazioni disposte lungo le gallerie principali.

I prelievi sulle venute idriche e sulle sorgenti sono stati eseguiti per ottenere ulteriori informazioni da aggiungere a quelle di natura idrodinamica per comprendere al meglio i meccanismi di circolazione sotterranea delle acque nell’ammasso gessoso.

I lavori di scavo sono iniziati a partire dal settore E, da dove arriva la maggior parte dei campioni, e proseguiti nel settore W.

Sorgenti

La sorgente Pirenta, tutt’ora attiva, è stata campionata diverse volte (PIRENTA 1 – PIRENTA 6), così come la sorgente posta a una quota leggermente più bassa (S PIRENTA 3 – S PIRENTA 6). La sorgente Ratanun (RATANUN), invece, è stata campionata una sola volta in quanto l’abbassamento del livello piezometrico indotto dalla cava ha fatto sì che tale sorgente si essiccasse molto rapidamente.

Settore Est

I primi campioni (SCE1, SCE2 ed SCE3) riguardano le acque prelevate presso il pozzo (PZ), utilizzato inizialmente per abbassare i livelli idrici dell’acquifero onde procedere alle operazioni di scavo in sicurezza, e scaricate, mediante un apposito canale, nel reticolo idrico superficiale.

Successivamente il campionamento ha riguardato direttamente lo scarico esterno (SCE4, SCE5 e SCE6) poiché, a causa del drenaggio indotto dagli scavi, i livelli idrici si sono abbassati e dal pozzo PZ non era più possibile emungere quantità significative di acqua.

Sono state campionate, inoltre, le acque provenienti dalle venute intercettate durante gli scavi (VE1, VE2, VE3, VE5 e VE6) in diversi periodi e tre venute (VE4a, VE4b e VE4c) attive durante il campionamento del 20.12.2011 (Figura 170). Le venute VE5 e VE6 sono state campionate due volte in data 08.03.13 e 25.07.13. La venuta VE4b è stata campionata tre volte: il 20.12.2011, il 08.03.13 e il 25.07.13.

Settore Ovest

Nel settore Ovest i lavori in sottterraneo hanno intercettato l’acquifero in un secondo momento e con venute decisamente inferiori rispetto il settore Est. Tale fatto è dovuto essenzialmente all’opera di

drenaggio esercitata dalle gallerie dell'imbocco E che si trovano ad una quota decisamente inferiore rispetto a quelle del lato Ovest.

In tale settore sono stati prelevati i campioni SCW1, SCW2, SCW3 ed SCW4 relativi allo scarico e la venuta VW1 proveniente dal contatto marne – livello “micro”.



Figura 170: Campionamenti delle venute intercettate durante gli scavi del settore Est

La Figura 171 mostra i punti di campionamento nei due settori EST e OVEST.

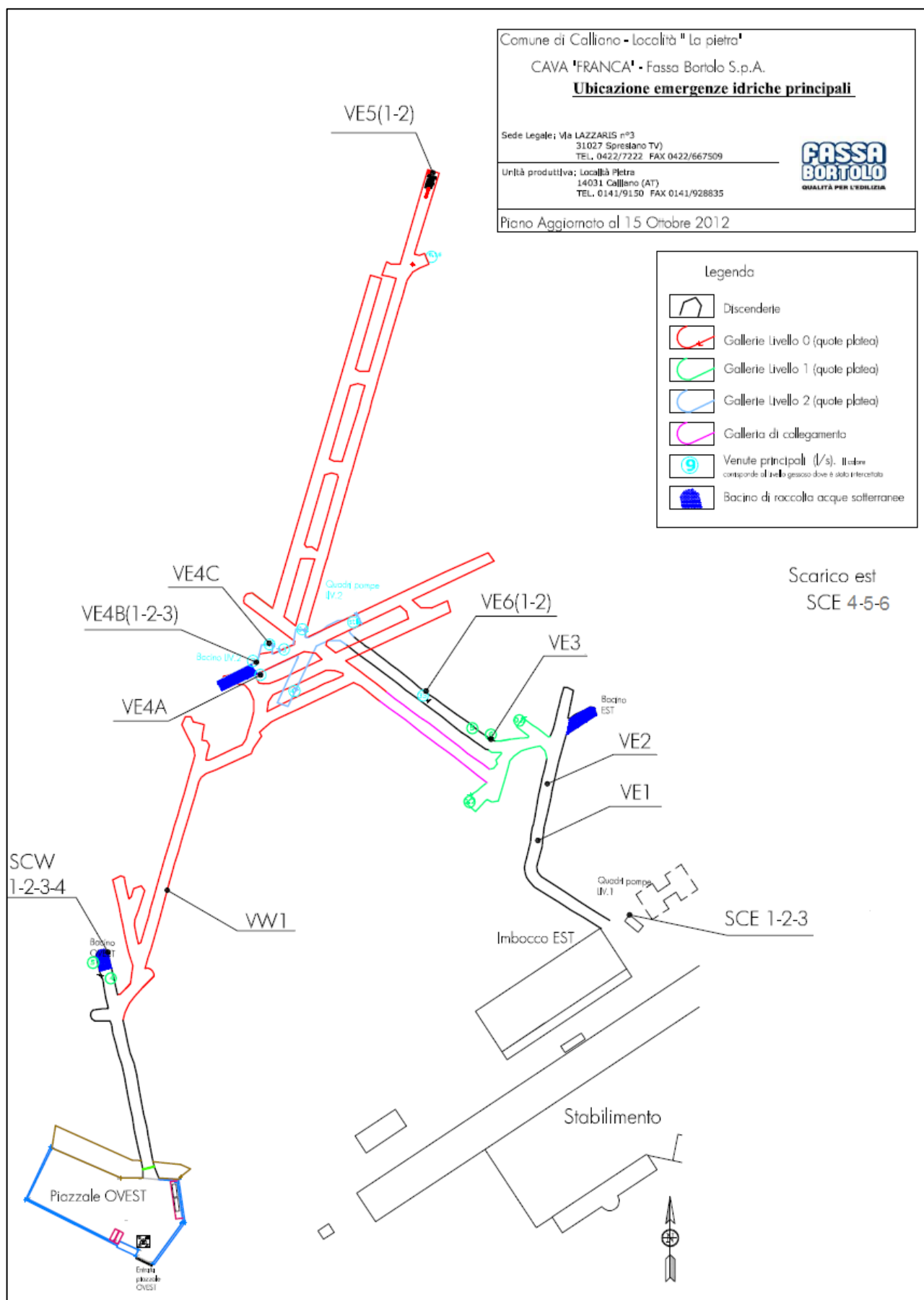


Figura 171: Ubicazione dei punti di campionamento delle acque presso la cava

Per meglio visualizzare e confrontare le diverse acque analizzate si è utilizzato il diagramma interpretativo di Schoeller che meglio si presta agli scopi prefissi.

Dai dati ottenuti risulta che le acque analizzate presentano una mineralizzazione elevata tipica della lisciviazione dei gessi con alti contenuti in solfati e ione calcio. Non trascurabili sono anche i tenori di cloruri, alcalini e magnesio. I nitrati presentano una notevole variabilità con un range compreso tra <0.010 e 46.900 mg/l legata ai diversi tipi di acque intercettate durante gli scavi che possono essere di origine profonda (povere di nitrati) o provenienti dalla ricarica diretta zenitale (più ricche di nitrati perché attraversano suoli agricoli). Molti campioni sono il risultato di miscelamenti tra questi due tipi di acque.

In tutti i casi la facies idrochimica principale risulta essere *solfato-calcica*. Per quanto riguarda le possibili facies secondarie si osserva che esse sono generalmente *bicarbonato-magnesiaca* e/o *cloruro-alcalina*.

Il diagramma di Figura 172 mostra il chimismo della sorgente Pirenta.

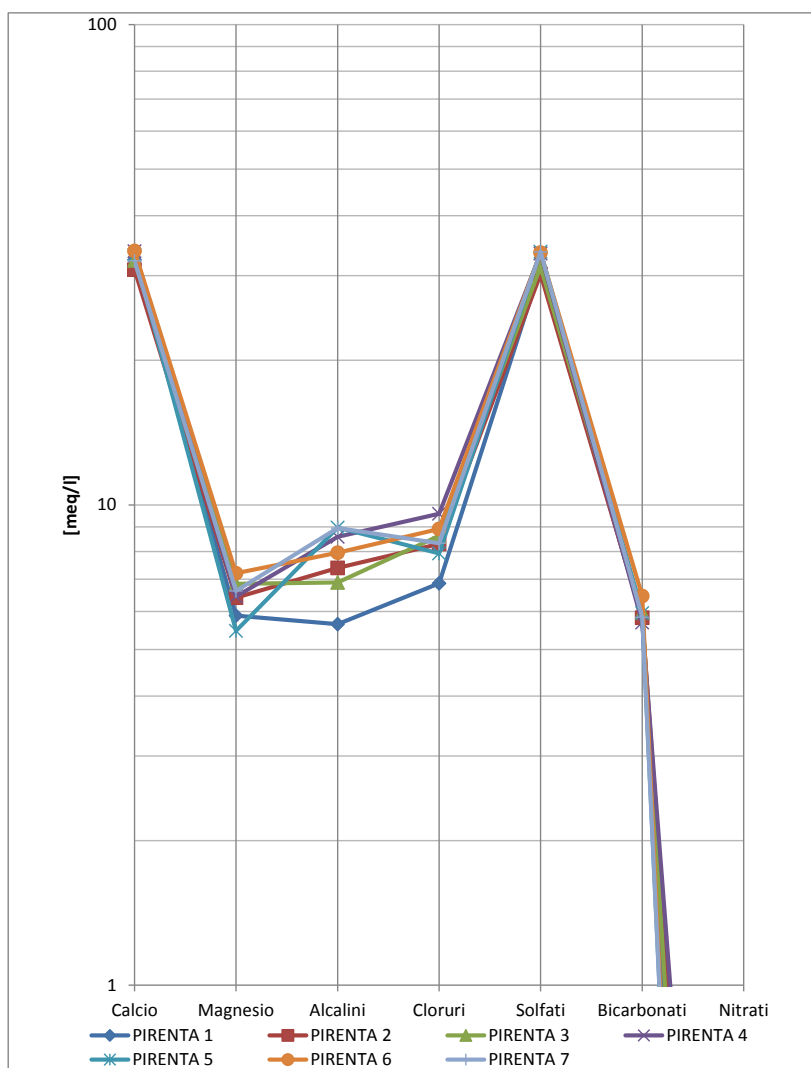


Figura 172: Diagramma di Schoeller relativo ai campionamenti presso la sorgente Pirenta

La sorgente denominata Sotto Pirenta di cui si riporta il diagramma di Schoeller in Figura 173 mostra, rispetto alla Sorgente Pirenta, un elevato contenuto di ioni Magnesio, Alcalini e Cloruri e anche una maggior concentrazione di ioni Solfati.

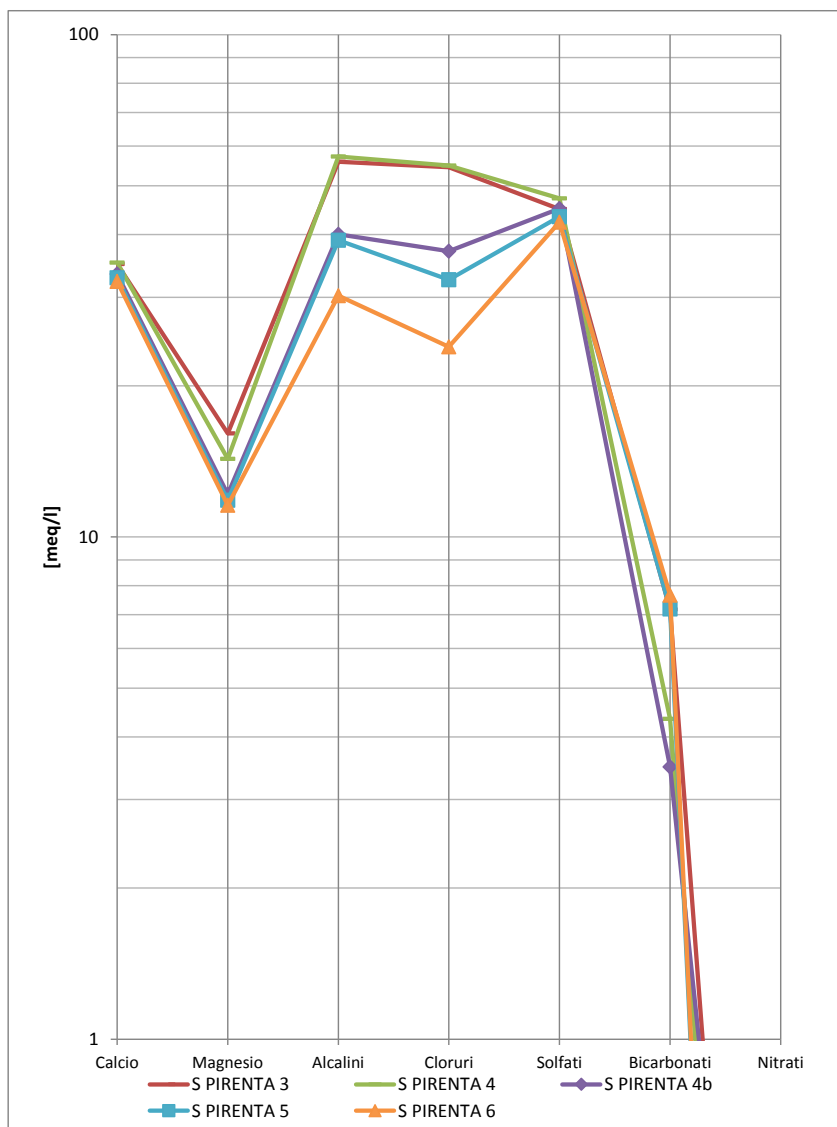


Figura 173: Diagramma di Schoeller relativo ai campionamenti presso la sorgente Sotto Pirenta

Il diagramma di Figura 174 è relativo all'unico campionamento effettuato presso la Sorgente Ratanun

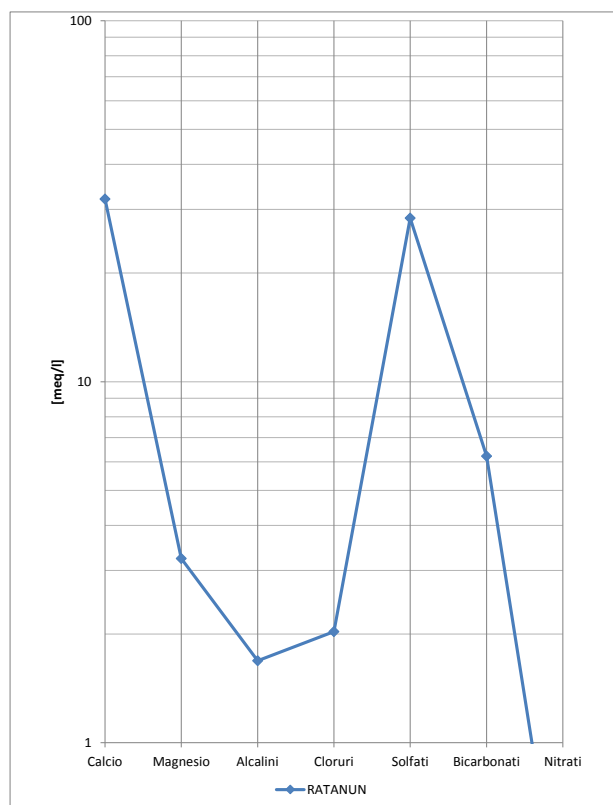


Figura 174: Diagramma di Schoeller relativo al campionamento presso la sorgente Ratanun

La Figura 175 mostra il diagramma di Schoeller relativo ai campioni prelevati presso il pozzo PZ e lo scarico E in ordine di tempo (SCE1 –SCE6). Osservando il diagramma si nota che i primi tre campioni (tutti eseguiti al pozzo nell’arco di 10 mesi dal 04.06.2010 al 28.04.2011) sono molto simili tra loro con irrilevanti differenze che riguardano il contenuto di ioni alcalini e nitrati. Successivamente, nelle acque campionate presso lo scarico E, si osserva un discreto aumento della mineralizzazione, rispetto ai campioni precedenti, dovuta essenzialmente al maggior tenore di ioni alcalini e cloruri. I nitrati mostrano, per l’ultimo campionamento, valori decisamente ridotti. Tali differenze sono essenzialmente legate ad un mescolamento tra acque di circolazione più superficiale (intercettate durante le prime fasi dello scavo) con acque legate a una circolazione più profonda nell’ammasso gessoso (intercettate quando si sono raggiunti i livelli di gesso più profondi).

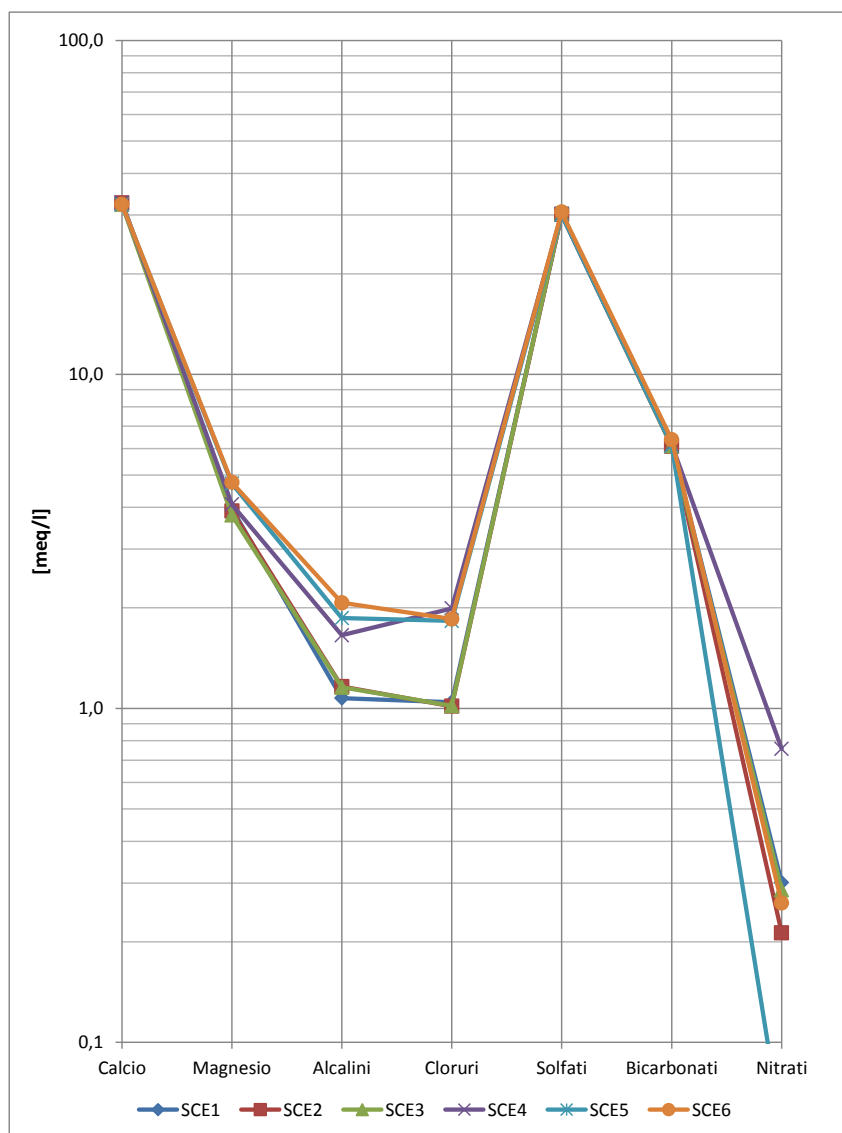


Figura 175: Diagramma di Schoeller relativo ai campioni prelevati presso il pozzo PZ e lo scarico E in ordine di tempo

Il diagramma di Schoeller della Figura 176 si riferisce alle acque dello scarico dell'imbocco Ovest. I campioni SCW1, SCW2, SCW3 ed SCW4 evidenziano un progressivo aumento della mineralizzazione di tali acque dovuto essenzialmente all'incremento dei tenori di cloruri, alcalini e magnesio. Anche in questo caso le differenze tra i diversi campionamenti sono legate a vari tipi di miscelamenti tra acque con circolazione più superficiale intercettate durante la prima fase degli scavi e acque più profonde raggiunte con il procedere dei lavori. La venuta VW1 presenta caratteristiche del tutto simili ai campioni raccolti presso lo scarico.

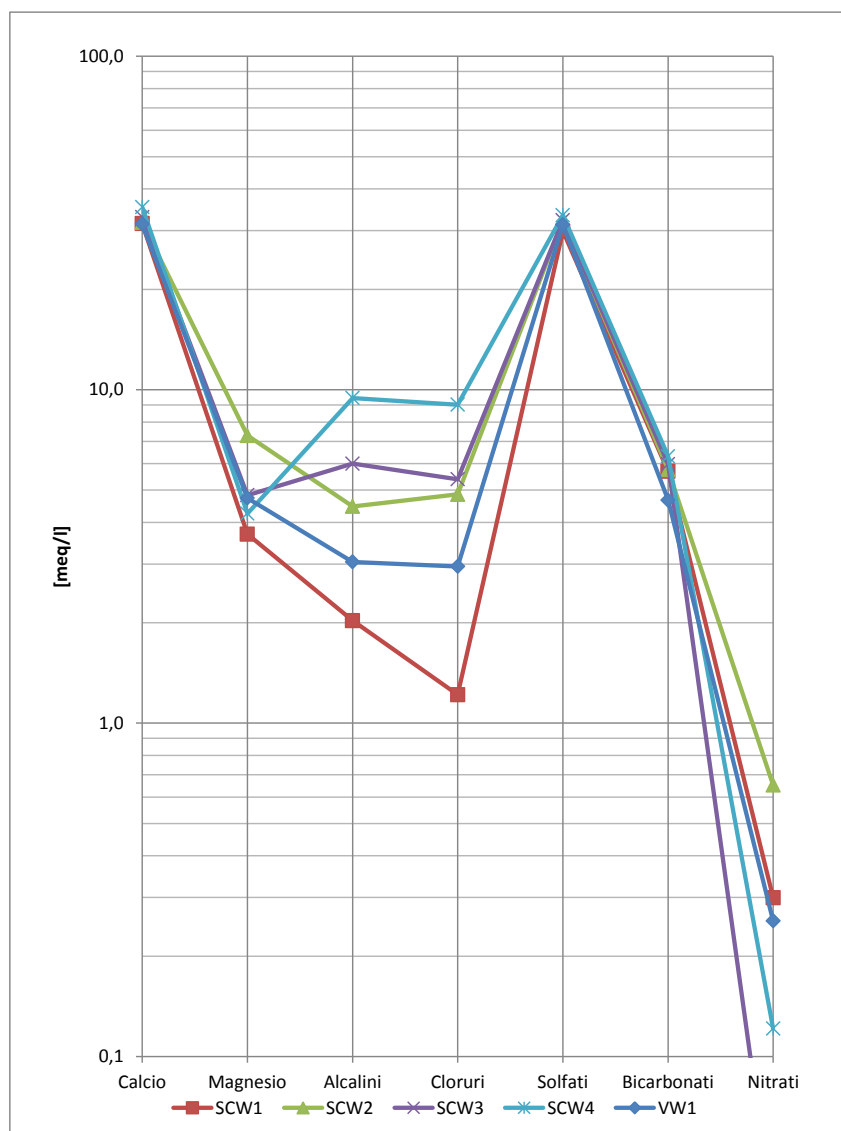


Figura 176: Diagramma di Schoeller relativo ai campioni prelevati presso l'imbocco Ovest

Sono state analizzate anche le acque di diverse venute idriche, intercettate durante i lavori di scavo, che poi confluiscono nei bacini di raccolta e successivamente pompate verso l'esterno.

Nel settore E sono state, in un primo momento, campionate le acque di circolazione più superficiale intercettate nelle fasi iniziali di scavo in più punti (campioni VE1, VE2, VE3, VE4a, VE4c, VE5-1, VE5-2 e VE6-1 e VE6-2). Tali campioni, interessano le acque che circolavano nel Banco 0 riferito al "gesso microcristallino" che, in seguito al proseguimento dei lavori, è stato del tutto drenato nel settore orientale della cava, pertanto la maggior parte di tali venute ora risulta del tutto inattiva. Queste acque presentano una facies idrochimica *solfato-calcica* con blande differenze nel contenuto di ioni alcalini e cloruri (Figura 177).

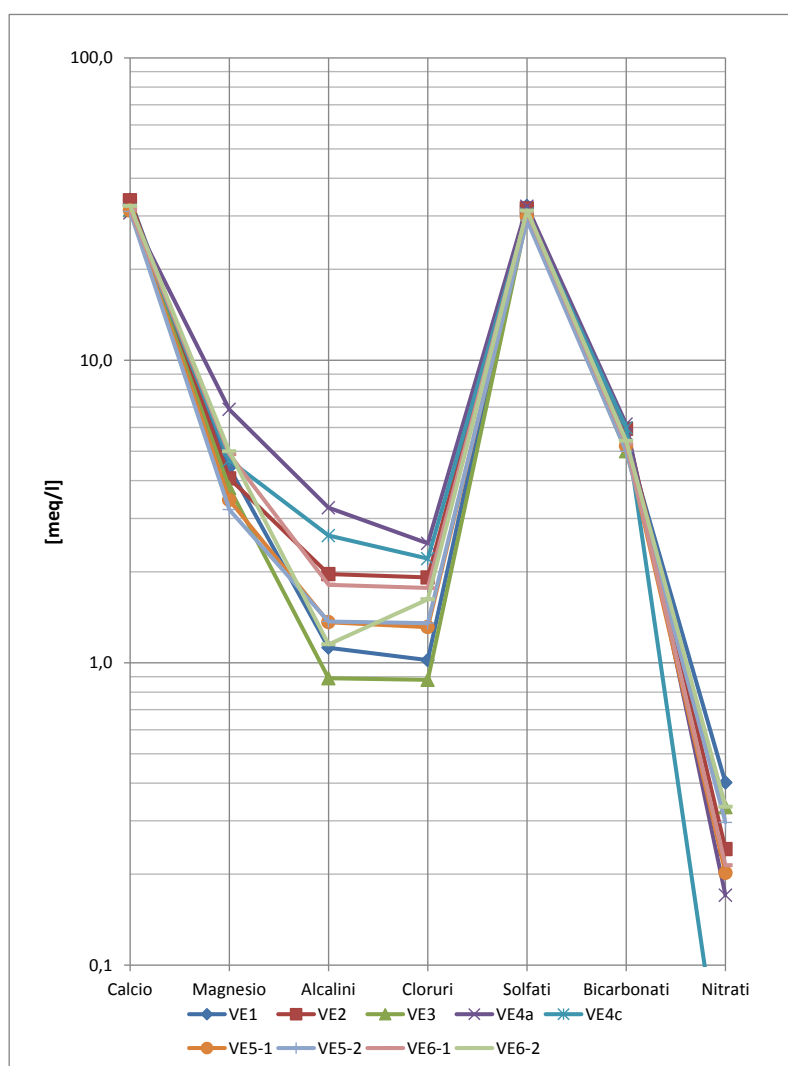


Figura 177: Diagramma di Schoeller relativo alle venute

La venuta VE4b è stata campionata tre volte in data 20/12/2011, 08/03/2013 e 25/07/2013 ed è caratterizzata da un potenziale redox negativo (- 222, -226, -170 mV) e da elevati contenuti in magnesio, alcalini, cloruri e solfati. È interessante notare come tale venuta sia ubicata a pochi metri di distanza dalla

venuta VE4a ma presenti caratteristiche chimiche del tutto diverse. Tale diversità è legata alle differenti profondità dei circuiti da cui tali acque provengono: VE4a più superficiale mentre VE4b più profondo (Figura 178).

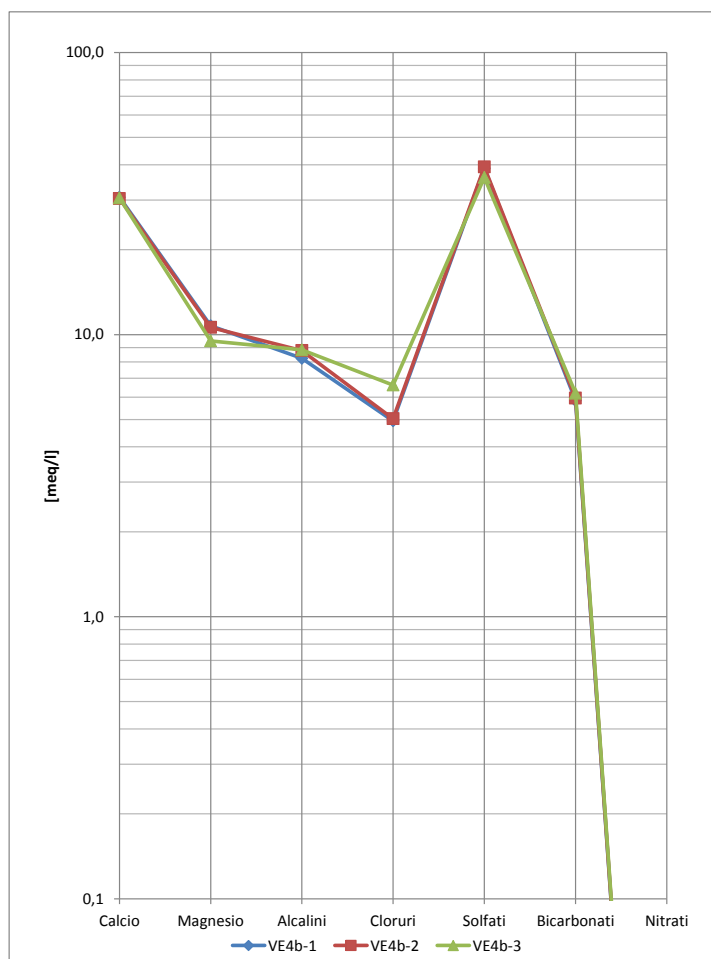


Figura 178: Diagramma di Schoeller relativo ai campioni prelevati presso la venuta VE4b

I risultati delle analisi chimiche sono riportate in Tabella 17 e in Tabella 18. I risultati delle analisi chimiche relative agli scarichi (SCE1 –SCE6, SCW1 – SCW4) sono riportate nel Paragrafo 8.2.6 dedicato agli scarichi.

Tabella 17: Risultati delle analisi chimiche in seguito a campionamento – Parte 1

CODICE	Data	Eh	pH	T [°C]	CE a 25°C [mS/cm]	TH [°f]	Sodio [mg/l]	Ammoni o [mg/l]	Potassio [mg/l]	Calcio [mg/l]	Magnesi o [mg/l]	Fluoruri [mg/l]	Cloriti [mg/l]	Bromati [mg/l]	Cloruri [mg/l]	Nitriti [mg/l]	Bromuri [mg/l]	Nitrati [mg/l]	Fosfati [mg/l]	Solfati [mg/l]	Bicarbona ti [mg/l]	TDS [mg/l]
PIRENTA 1	ott-08	0	0,00	0,00	0	191,5	125,880	< 0,010	6,711	649,090	71,477	0,732	< 0,020	< 0,005	243,308	0,028	1,014	0,049	< 0,010	1496,175	353,600	2948,064
PIRENTA 2	4-giu-10					186,7	166,750	0,970	5,413	619,120	77,960	0,560	< 0,020	< 0,005	294,000	0,160	< 0,010	0,380	< 0,010	1453,013	355,418	2973,744
PIRENTA 3	7-lug-10	-212	6,72	13,44	3540	195,8	154,920	0,184	6,058	647,070	83,270	0,510	< 0,020	< 0,005	305,540	0,145	0,015	0,125	0,020	1505,601	365,059	3068,517
PIRENTA 4	21-dic-10	-295	6,95	13,28	3280	201,0	192,440	1,036	8,339	675,940	78,330	0,000	< 0,020	< 0,005	339,700	0,200	1,370	0,650	< 0,010	1601,925	347,004	3246,934
PIRENTA 5	18-mag-11					193,2	201,360	1,476	8,304	664,030	66,468	0,000	< 0,020	< 0,005	280,976	< 0,005	< 0,010	0,010	< 0,010	1617,770	363,383	3203,777
PIRENTA 6	26-set-11					205,0	179,100	3,420	6,156	676,55	87,630	0,480	< 0,020	< 0,005	315,900	< 0,005	12,840	0,010	< 0,010	1610,254	393,980	3286,320
PIRENTA 7	25-lug-13	-233	6,77	14,10	4010	194,3	201,44	1,074	7,172	645,29	80,48	1,637	< 0,020	< 0,005	294,920	< 0,005	< 0,010	0,010	< 0,010	1614,380	355,937	3202,336
RATANUN	7-lug-10	120	6,76	14,96	2700	176,7	30,130	< 0,010	14,740	642,890	39,380	0,310	< 0,020	< 0,005	72,025	0,225	2,500	17,845	0,025	1364,087	379,825	2563,991
S PIRENTA 3	7-lug-10	-332	6,74	13,95	8940	255,3	1272,886	0,245	18,034	700,325	195,375	1,850	0,025	< 0,005	1930,875	1,175	9,050	0,550	< 0,010	2158,750	437,485	6726,625
S PIRENTA 4	21-dic-10	-370	6,98	13,59	6980	247,5	1302,763	0,568	20,493	704,670	173,830	1,138	< 0,020	< 0,005	1945,500	0,388	7,338	0,425	< 0,010	2267,700	265,054	6689,865
S PIRENTA 4b	28-apr-11	-376	6,85	13,91	7775	227,9	908,000	4,324	20,652	669,136	147,780	0,500	< 0,020	< 0,005	1314,000	< 0,005	12,370	1,800	< 0,010	2162,700	212,647	5453,909
S PIRENTA 5	18-mag-11					223,3	886,600	1,310	15,894	657,030	143,840	0,000	< 0,020	< 0,005	1152,100	< 0,005	18,300	0,010	< 0,010	2084,340	438,705	5398,129
S PIRENTA 6	26-set-11					219,3	680,928	5,995	23,554	646,350	140,576	0,300	< 0,020	< 0,005	847,600	< 0,005	35,500	0,010	< 0,010	2033,680	467,200	4881,693
VE1	4-giu-10	51	6,85	14,03	2910	191,9	24,190	0,014	2,689	680,140	53,626	0,510	< 0,020	< 0,005	36,145	0,155	< 0,010	24,890	< 0,010	1555,088	332,537	2709,984
VE2	21-dic-10	10	7,13	13,30	2440	189,4	42,195	0,046	5,035	676,800	49,470	0,355	< 0,020	< 0,005	67,860	< 0,005	0,290	15,005	< 0,010	1526,650	362,081	2745,787
VE3	28-apr-11	26	7,08	13,29	2632	175,7	19,130	< 0,010	2,180	627,800	46,001	0,320	< 0,020	< 0,005	31,125	0,240	< 0,010	20,640	< 0,010	1429,700	304,958	2482,094
VE4a	20-dic-11	15	7,48	13,30	3020	188,1	71,570	0,070	5,465	615,620	83,570	0,550	< 0,020	< 0,005	87,950	0,305	< 0,010	10,555	< 0,010	1551,120	374,956	2801,731
VE4b-1	20-dic-11	-222	6,70	13,50	3760	207,3	184,140	1,115	9,090	614,730	130,630	0,760	< 0,020	< 0,005	175,326	< 0,005	< 0,010	0,010	< 0,010	1867,180	356,407	3339,388
VE4b-2	8-mar-13	-226	6,82	13,65	3520	205,1	186,580	0,260	25,770	608,760	128,945	1,180	< 0,020	< 0,005	178,534	< 0,005	< 0,010	0,010	< 0,010	1886,887	363,686	3380,612
VE4b-3	25-lug-13	-170	6,80	13,90	3520	200,2	187,294	0,341	26,607	611,220	115,484	0,665	< 0,020	< 0,005	234,920	< 0,005	< 0,010	0,010	< 0,010	1731,980	378,238	3286,759
VE4c	20-dic-11	50	6,87	13,30	2890	180,7	58,250	0,055	3,908	629,950	56,790	0,495	< 0,020	< 0,005	78,330	< 0,005	< 0,010	2,082	< 0,010	1463,720	364,760	2658,340
VE5-1	8-mar-13	211	6,81	13,12	2660	173,9	22,089	< 0,010	15,695	627,385	41,950	0,560	< 0,020	< 0,005	46,520	< 0,005	< 0,010	12,520	< 0,010	1430,505	317,863	2515,087
VE5-2	25-lug-13	150	6,87	14,00	2630	171,2	21,984	< 0,010	16,157	621,480	38,990	0,873	< 0,020	< 0,005	47,950	< 0,005	< 0,010	18,380	< 0,010	1394,014	305,263	2465,091
VE6-1	8-mar-13	141	6,73	13,22	2680	182,0	24,060	< 0,010	29,860	630,905	59,494	0,600	< 0,020	< 0,005	62,640	< 0,005	< 0,010	13,260	< 0,010	1488,756	323,232	2632,807
VE6-2	25-lug-13	148	6,72	14,50	2630	187,1	23,150	< 0,010	5,608	649,300	60,775	0,452	< 0,020	< 0,005	57,450	< 0,005	< 0,010	20,720	< 0,010	1501,205	330,463	2649,123
VW1	28-apr-11	44	6,91	13,54	3030	180,7	67,720	0,014	3,818	628,980	57,510	0,321	< 0,020	< 0,005	104,586	< 0,005	3,710	15,815	< 0,010	1499,920	284,579	2666,973

Tabella 18: Risultati delle analisi chimiche in seguito a campionamento – Parte 2

CODICE	Data	Li (ppb)	Al (ppb)	V (ppb)	Cr (ppb)	Mn (ppb)	Fe (ppb)	Co (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	Ga (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Rb (ppb)	Sr (ppb)	Ag (ppb)	Cd (ppb)	Cs (ppb)	Ba (ppb)	Tl (ppb)	Pb (ppb)	Bi (ppb)	U (ppb)
PIRENTA 1	ott-08					17,00	3,59																	
PIRENTA 2	4-giu-10		1279,00	< 1	< 1	42,95	43,26	< 1	< 1	< 1	7,18	< 1	7,64	37,44	3,68	16660,00	< 1	< 1	< 1	5,07	< 1	< 1	< 1	2,45
PIRENTA 3	7-lug-10		313,50	< 1	< 1	43,22	20,29	< 1	< 1	< 1	4,11	< 1	7,73	34,51	3,49	15650,00	< 1	< 1	< 1	4,96	< 1	< 1	< 1	2,68
PIRENTA 4	21-dic-10	26,94	< 1	< 1	< 1	50,50	114,60	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	10,99	52,14	4,28	14610,00	< 1	< 1	< 1	5,85	< 1	< 1	< 1	2,73
PIRENTA 5	18-mag-11	59,11	1,25	< 1	< 1	82,50	76,99	< 1	< 1	< 1	3,08	< 1	12,68	49,84	3,92	13050,00	< 1	< 1	< 1	8,78	< 1	< 1	< 1	1,47
PIRENTA 6	26-set-11	51,79	7,06	< 1	< 1	69,83	77,93	< 1	< 1	< 1	1,28	< 1	13,27	54,28	4,16	12620,00	< 1	< 1	< 1	6,91	< 1	< 1	< 1	1,55
PIRENTA 7	25-lug-13	26,07	< 1	< 1	< 1	41,90	7,09	< 1	< 1	< 1	2,22	< 1	12,24	52,76	2,81	4476,00	< 1	< 1	< 1	4,36	< 1	< 1	< 1	1,01
RATANUN	7-lug-10		1404,00	< 1	1,18	2,37	12,49	< 1	2,48	< 1	1,91	< 1	< 1	7,71	1,80	16620,00	< 1	< 1	< 1	5,06	< 1	< 1	< 1	6,64
S PIRENTA 3	7-lug-10		2988,00	< 1	< 1	39,03	68,99	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	42,53	207,10	7,02	15920,00	< 1	1,10	< 1	3,01	< 1	< 1	< 1	< 1
S PIRENTA 4	21-dic-10	66,12	8,24	< 1	< 1	48,60	20,74	< 1	< 1	< 1	3,07	< 1	58,90	279,80	9,15	13170,00	< 1	< 1	< 1	4,23	< 1	< 1	< 1	< 1
S PIRENTA 4b	28-apr-11	26,66	5,66	< 1	< 1	8,98	8,69	< 1	< 1	< 1	1,39	< 1	11,50	46,09	1,60	2467,00	< 1	< 1	< 1	4,21	< 1	< 1	< 1	< 1
S PIRENTA 5	18-mag-11	25,50	6,37	< 1	< 1	10,08	4,61	< 1	< 1	< 1	2,12	< 1	11,83	47,16	1,66	2715,00	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
S PIRENTA 6	26-set-11	65,60	70,85	< 1	< 1	53,22	97,04	< 1	< 1	< 1	2,00	< 1	33,21	135,70	7,08	10970,00	< 1	< 1	< 1	4,35	< 1	< 1	< 1	< 1
VE1	4-giu-10		206,50	< 1	1,21	< 1	288,10	< 1	2,79	2,42	10,32	< 1	< 1	4,15	1,95	16130,00	< 1	< 1	< 1	6,09	< 1	1,10	< 1	4,78
VE2	21-dic-10	29,39	5,87	< 1	1,45	1,01	15,56	< 1	3,04	< 1	1,37	< 1	2,04	10,74	2,61	14630,00	< 1	< 1	< 1	6,73	< 1	< 1	< 1	5,64
VE3	28-apr-11	18,54	< 1	< 1	1,19	< 1	16,20	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	4,25	1,46	12930,00	< 1	< 1	< 1	6,18	< 1	< 1	< 1	5,38
VE4a	20-dic-11	18,53	< 1	< 1	< 1	31,11	12,91	< 1	15,47	< 1	4,53	< 1	3,26	16,08	2,78	11580,00	< 1	< 1	< 1	2,77	< 1	< 1	< 1	3,81
VE4b-1	20-dic-11	37,42	< 1	< 1	< 1	29,25	12,45	< 1	1,90	< 1	< 1	< 1	7,03	28,36	4,29	11720,00	< 1	< 1	< 1	1,64	< 1	< 1	< 1	1,16
VE4b-2	8-mar-13	n.d.	< 1	< 1	< 1	36,79	14,21	< 1	3,46	< 1	< 1	< 1	8,84	35,52	3,95	4328,00	< 1	< 1	< 1	1,81	< 1	< 1	< 1	1,51
VE4b-3	25-lug-13	36,28	< 1	< 1	< 1	40,10	8,45	< 1	4,85	< 1	3,75	< 1	8,58	36,94	4,30	5483,00	< 1	< 1	< 1	2,30	< 1	< 1	< 1	2,20
VE4c	20-dic-11	13,14	< 1	< 1	< 1	18,38	5,65	< 1	5,09	< 1	1,20	< 1	2,61	11,76	1,94	13360,00	< 1	< 1	< 1	3,37	< 1	< 1	< 1	3,52
VE5-1	8-mar-13	n.d.	< 1	< 1	< 1	< 1	4,51	< 1	2,51	< 1	< 1	< 1	< 1	5,78	1,48	5297,00	< 1	< 1	< 1	5,45	< 1	< 1	< 1	4,38
VE5-2	25-lug-13	15,87	1,95	< 1	1,04	< 1	11,77	< 1	3,14	5,72	11,91	< 1	1,54	7,96	2,42	8992,00	< 1	< 1	< 1	8,73	< 1	< 1	< 1	8,99
VE6-1	8-mar-13	n.d.	< 1	< 1	< 1	< 1	3,70	< 1	2,11	< 1	< 1	< 1	1,03	5,59	1,43	4830,00	< 1	< 1	< 1	4,45	< 1	< 1	< 1	4,33
VE6-2	25-lug-13	30,61	21,43	< 1	1,64	3,01	35,22	< 1	3,54	< 1	5,01	< 1	2,53	12,56	2,76	9833,00	< 1	< 1	< 1	8,57	< 1	< 1	< 1	11,19
VW1	28-apr-11	48,68	99,29	< 1	1,10	36,50	116,10	< 1	5,29	< 1	114,10	< 1	5,04	20,95	2,80	1342,00	< 1	< 1	< 1	5,46	< 1	< 1	< 1	6,28

8.2.5. INTERPRETAZIONE DEI DATI E CONSIDERAZIONI GENERALI

Sulla base delle osservazioni effettuate nelle gallerie di scavo della Cava Franca, risulta una situazione dello stato di carsificazione e fratturazione dell'ammasso gessoso molto diversa rispetto a quella evidenziata nella vicina Cava Monferrato presso Moncalvo d'Asti, dove sono presenti poche ma importanti cavità carsiche attive, di grandi dimensioni, ed un ammasso gessoso caratterizzato da una fratturazione molto limitata.

Presso il sito di Calliano il gesso microcristallino si presenta relativamente compatto con locali presenze di fratture e condotti carsici di dimensioni molto ridotte, inferiori a 20 cm, mentre i banchi di gesso macrocristallino sono caratterizzati da una fratturazione minuta e diffusa in entrambi i livelli. Sono inoltre presenti numerosi condotti carsici con spiccata morfologia a "pieno carico" che raggiungono sezioni di 1-2 decimetri e che si estendono in tutto l'ammasso roccioso.

Tale situazione condiziona pesantemente l'assetto idrogeologico della zona in studio con la presenza di un **acquifero libero che può essere definito "continuo"** ed una circolazione idrica sotterranea di tipo dispersivo (Vigna, 2007) (Galleani, Vigna, Banzato, & Lo Russo, 2011).

La Figura 179 rappresenta schematicamente la struttura acquifera impostata nei gessi di Calliano: a differenza dell'acquifero descritto nel caso studio di Moncalvo in cui il dato piezometrico è rappresentativo solo di una circolazione secondaria, in questo tipo di acquiferi, ancorché carsici, la circolazione è ben rappresentata dal dato di livello piezometrico misurato all'interno dei diversi piezometri distribuiti nell'area di cava. La fratturazione diffusa nell'intero ammasso rende **possibile la ricostruzione della superficie piezometrica** la quale evidenzia **interferenze anche a grande distanza** dall'opera in sotterraneo e interessa sia circuiti più superficiali che circuiti più profondi con conseguenti abbassamenti idrici nei pozzi, annullamento delle portate delle sorgenti e riduzioni delle portate dei corsi d'acqua superficiali.

La realizzazione di opere in sotterraneo interessanti acquiferi di questa tipologia, ovvero a circolazione dispersiva (o a bassa velocità di flusso), deve prevedere un monitoraggio piuttosto esteso sia delle acque più superficiali sia delle acque provenienti da circuiti più profondi.

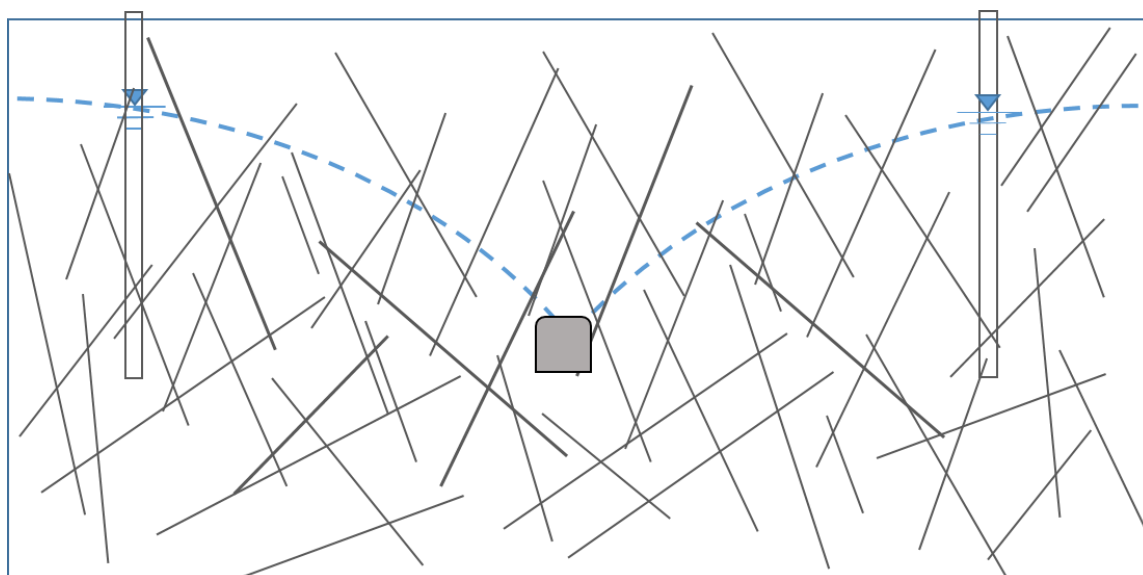


Figura 179: Struttura schematica del modello di circolazione idrica impostato nei gessi della cava di Calliano

La circolazione di tipo dispersivo, individuata nell'area di Calliano, viene innanzitutto evidenziata dalla **regolarità della superficie piezometrica** ricostruita attraverso le misure dei livelli idrici eseguite nei diversi piezometri della zona in studio. Generalmente in un ammasso carsificato risulta impossibile ricostruire l'andamento delle linee isopiezometriche a causa della notevole eterogeneità dell'acquifero con le quote dei livelli idrici non correlabili tra loro. Inoltre la presenza di un acquifero "continuo" e relativamente omogeneo è sottolineata dal trend di abbassamento dei livelli idrici, esercitato dalle gallerie di cava, che interessa tutti i piezometri dell'area in esame (Figura 180).

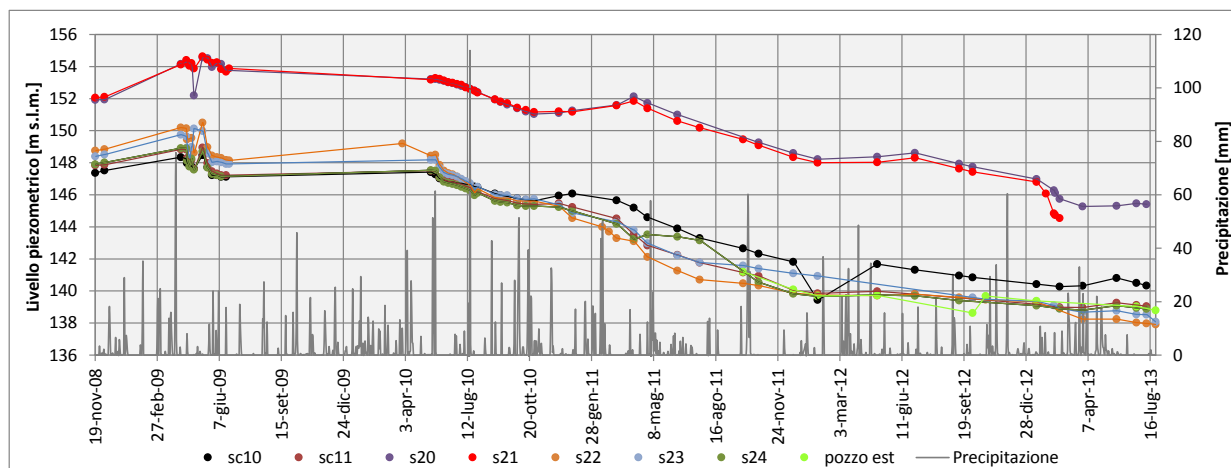


Figura 180: Andamento dei livelli piezometrici nell'area di cava di Calliano

Dai dati di monitoraggio risulta che tale abbassamento avviene in tempi molto lunghi anche nei piezometri più prossimi all'area di scavo.

Utilizzando i dati piezometrici reali esposti in Tabella 19 e ipotizzando che il trend degli abbassamenti rimanga costante nel tempo è stato stimato che a fine del 2014 i livelli piezometrici si attesteranno mediamente intorno alla quote riportate in Tabella 20 con un abbassamento medio di circa 13,6 metri rispetto alla data del 14/05/2010. Il dato relativo al piezometro S21 non è stato inserito nella tabella delle stime in quanto intercettato dai lavori di scavo in data 06/03/2013.

Tabella 19: Dati piezometrici misurati presso la cava

Data	SC10	SC11	S20	S21	S22	S23	S24
14/05/2010	147,42	147,51	153,22	153,18	148,43	148,18	147,53
03/10/2012	140,85		147,75	147,43	139,54	139,60	
14/01/2013	140,43	139,18	146,98	146,8	139,31	139,35	139,08
10/07/2013	140,34	139,05	145,41		137,98	138,53	138,88

Tabella 20: Ipotesi dei dati piezometrici a fine 2014

Data	SC10	SC11	S20	S22	S23	S24
31/12/2014	133,92	133,84	139,55	134,76	134,51	133,86

L'abbassamento lento e graduale dei livelli piezometrici è un'ulteriore conferma della correttezza del **modello idrogeologico costituito da un acquifero piuttosto esteso con livelli di gesso potenti e continui**;

l'ipotesi, rappresentata dalla carta geologica di trino che evidenziava piccoli acquiferi isolati, non risulta compatibile con i dati finora raccolti.

Per quanto riguarda l'opera in esame, per consentire l'avanzamento dello scavo e la prosecuzione della coltivazione dei diversi banchi di gesso occorrerà procedere all'ulteriore abbassamento dei livelli idrici. A causa delle ridotte variazioni delle quote piezometriche nel tempo finora operate dagli scavi esistenti sottofaldia risulterà necessario realizzare una nuova serie di gallerie drenanti ubicate in diversi settori dell'area di concessione mineraria.

Le gallerie drenanti sono scavi a sviluppo allungato che vanno ad impegnare in tutto o in parte la zona di un acquifero, con lunghezza, sezione e pendenza tali da permettere di raccogliere e portare a giorno (o a una stazione di pompaggio) una determinata quantità d'acqua sotterranea.

La geometria in pianta di tali gallerie dovrà essere coerente con il progetto di avanzamento della cava il cui sviluppo è previsto nel livello 2 (livello a quota inferiore). La sezione di scavo sarà la stessa finora utilizzata per le gallerie destinate all'estrazione.

La realizzazione di tali gallerie dovrà essere effettuata nel più breve tempo possibile per consentire l'abbassamento dei livelli piezometrici nell'area di scavo e poter proseguire con i lavori di coltivazione della cava nelle condizioni "ideali". Con tale termine si indicano situazioni in cui l'estrazione del materiale gessoso avviene in assenza di acqua che mescolandosi con il materiale stesso, al momento della fresatura, creerebbe una soluzione molto viscosa che ostacolerebbe i processi di estrazione, trasporto e successivo trattamento.

Per favorire ulteriormente il processo di drenaggio potrebbero essere realizzati una serie di dreni a raggera da effettuarsi sia in calotta che sui piedritti. Tali dreni dovrebbero essere realizzati attraverso una serie di perforazioni con diametri inferiori a 10 cm e con lunghezze dell'ordine di 10 – 30 m.

Le gallerie drenanti potranno essere realizzate a partire dalla galleria già esistente nel livello 2 e che svolge già attualmente una funzione di drenaggio ed accumulo delle acque drenate.

L'ubicazione di tali gallerie è riportata in Figura 181.

Tale opera di drenaggio risulta indispensabile per consentire il regolare avanzamento dei lavori di coltivazione a fronte dei ridotti decrementi, fin'ora misurati. Più punti di drenaggio distribuiti in maniera opportuna permetteranno di evacuare una maggior quantità di acqua nel tempo e di conseguenza ottenere un abbassamento dei livelli idrici in tempi più brevi.

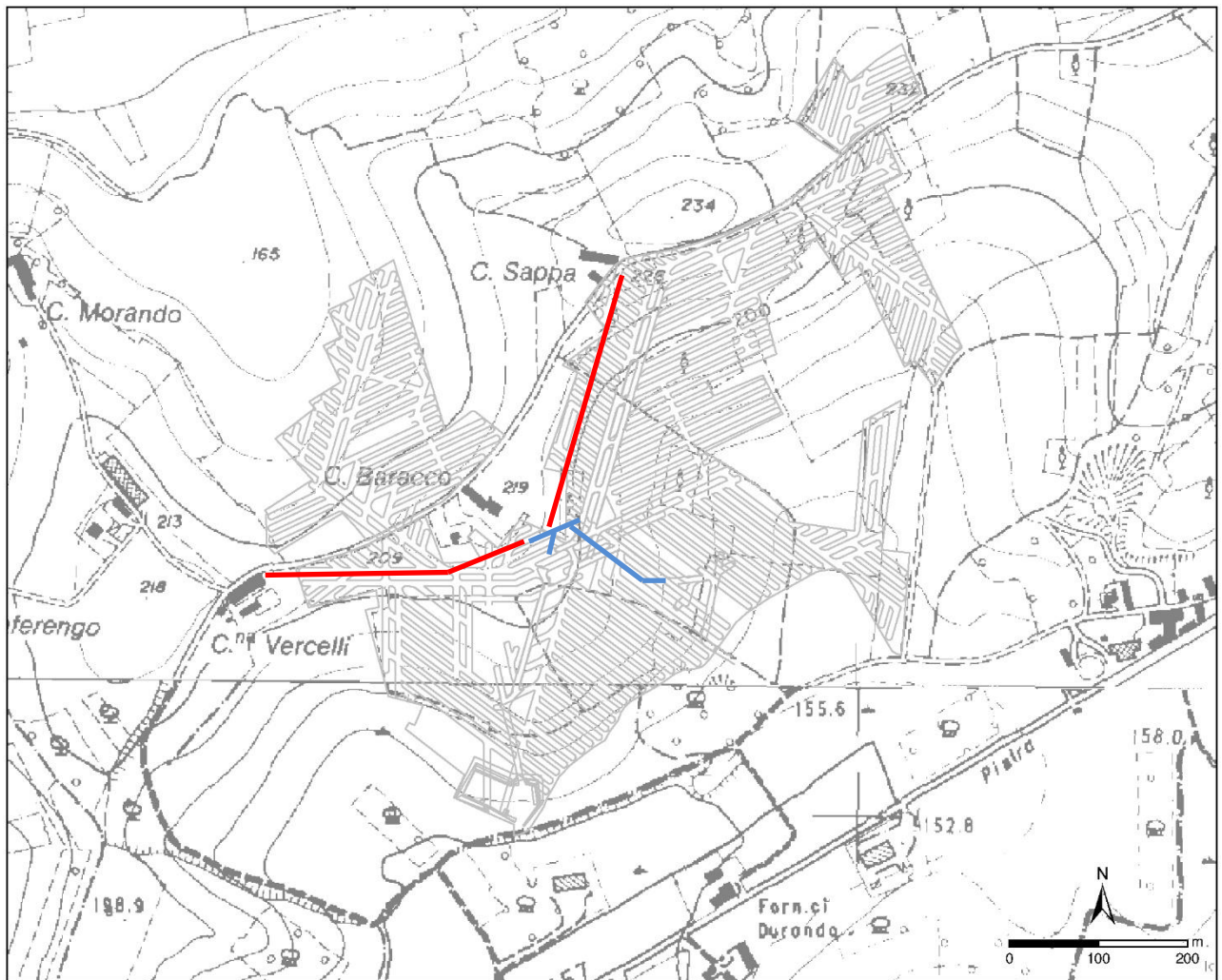


Figura 181: Ubicazione delle gallerie per il drenaggio

L'impatto, conseguente alla realizzazione di tali gallerie, che si verificherebbe nella zona circostante l'area di cava si presume possa essere limitato al solo abbassamento dei livelli idrici. Tale abbassamento comporterà il prosciugamento di eventuali pozzi presenti nella zona. Attualmente vi è un solo pozzo di cui si conosce l'esistenza utilizzato saltuariamente per scopi industriali. Sulla base dei dati idrogeologici fino ad ora acquisiti (tipologia del mezzo acquifero, andamento dei livelli piezometrici, chimismo delle acque, ecc) gli abbassamenti indotti non dovrebbero causare fenomeni di subsidenza nè eventuali sinkhole. Tale considerazione nasce dal fatto che i fenomeni di subsidenza sono tipici degli acquiferi a matrice porosa fine, mentre negli acquiferi fratturati e carsificati fenomeni di subsidenza sembrano da escludersi. Inoltre la possibilità di sinkhole e crolli superficiali per collasso di ampie cavità carsiche presenti nell'ammasso gessoso sembra anch'essa da escludersi in quanto, finora, non sono mai stati intercettati (sia tramite sondaggi geognostici sia tramite le opere di scavo) vuoti carsici di ampie dimensioni.

Occorre evidenziare che, in ogni caso, in un ambiente carsico come quello dei gessi di Calliano non sono da escludersi crolli e/o sinkhole di origine naturale che tendono a verificarsi nelle zone più superficiali quindi non correlabili con l'abbassamento dei livelli idrici.

Dovrà essere comunque predisposta una rete di monitoraggio in superficie nell'area prossima alla cava al fine di controllare eventuali abbassamenti, anche molto esigui, o deformazioni del piano campagna attraverso una serie di dettagliate misurazioni topografiche.

Il confronto tra la chimica di alcune venute intercettate durante gli scavi evidenzia che l'ammasso gessoso presenta acque relativamente differenti legate a circolazioni più superficiali (caratterizzate dalla presenza anche di concentrazioni di nitrati piuttosto elevate) e circolazioni più profonde (acque con valori di nitrati molto bassi e potenziali redox negativi).

8.2.6. LE ACQUE DI SCARICO DELLA CAVA

I lavori di scavo della cava di gesso "Franca" nel comune di Calliano hanno intercettato una serie di venute idriche, in genere molto distribuite sull'intera lunghezza delle gallerie poste al di sotto del livello di saturazione (Figura 182). Le zone maggiormente acquifere corrispondono ai settori più fratturati dell'ammasso roccioso e/o alle porzioni in cui vengono intercettate le cavità carsiche. Le acque di tali venute vengono raccolte in alcuni bacini dotati di pompe per evacuare le stesse verso la superficie. I bacini di raccolta principali sono ubicati in corrispondenza delle discenderie dell'imbocco Ovest (Figura 183) e dell'imbocco Est (Figura 184).

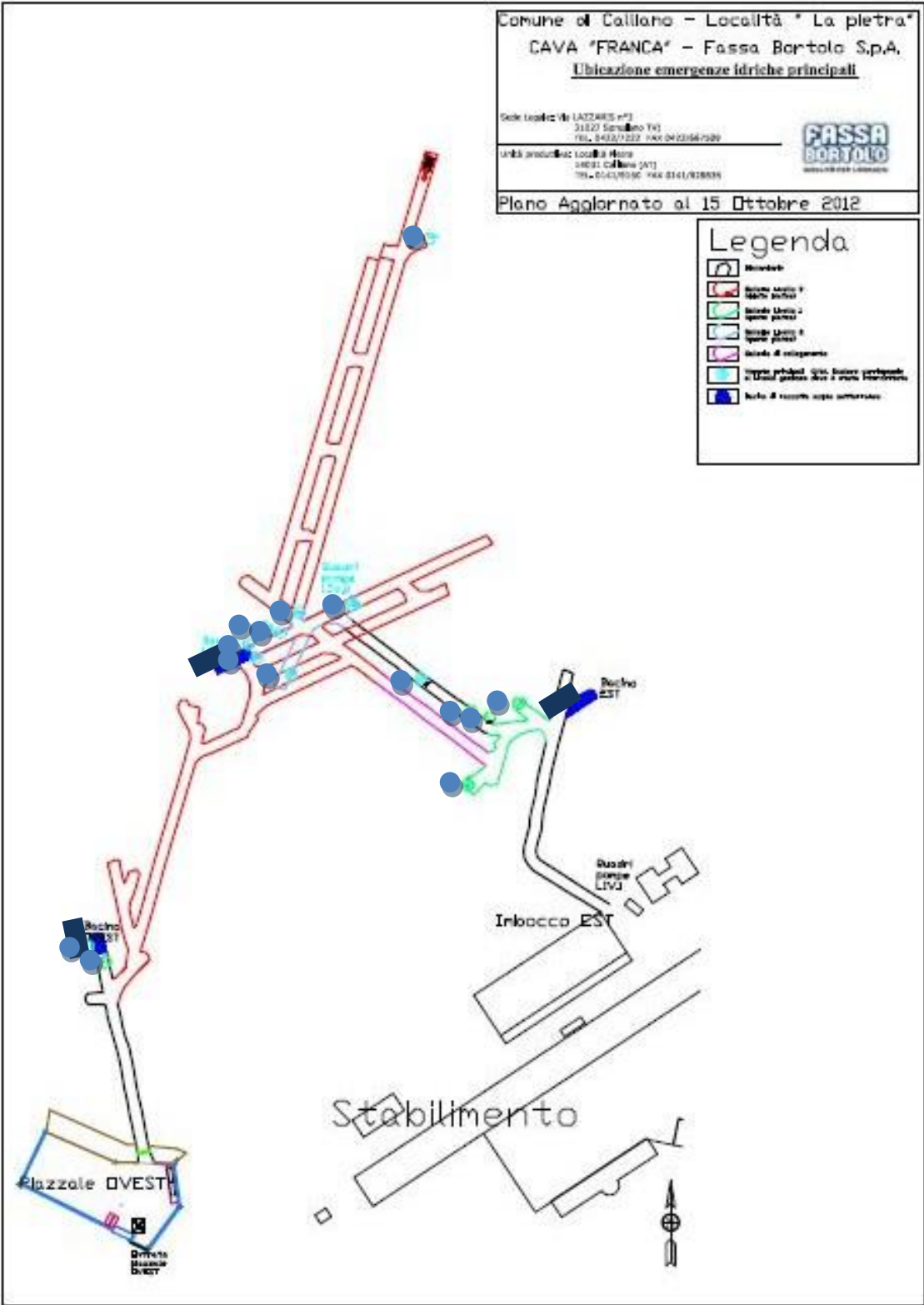


Figura 182: Planimetria delle gallerie e delle principali venute idriche intercettate (pallini azzurri) e dei bacini idrici (rettangoli blu)

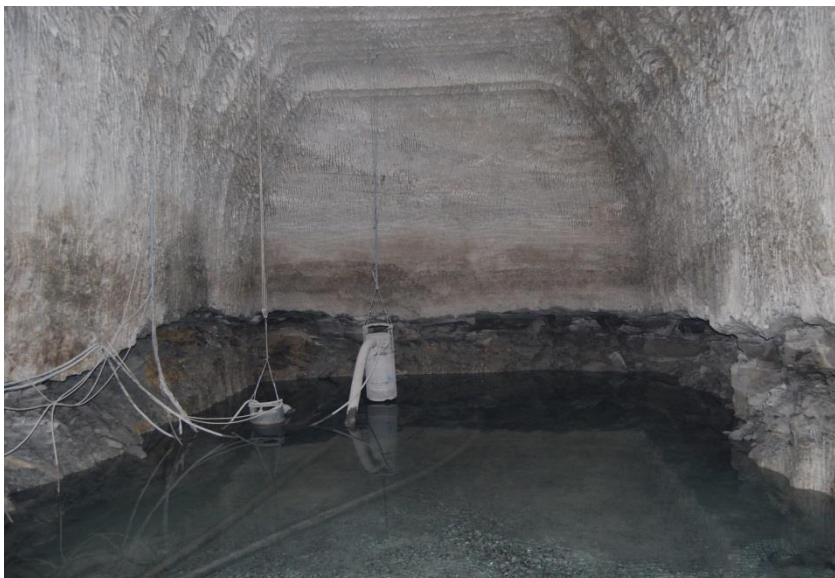


Figura 183: Bacino di raccolta d'acqua presso l'imbocco Ovest



Figura 184: Bacino di raccolta d'acqua presso l'imbocco Est

Tali bacini sono dotati di un sistema di monitoraggio con telecamere (Figura 185) che registrano, in continuo, le variazioni dei livelli idrici e trasmettono le immagini verso un sistema di acquisizione esterno ubicato presso gli uffici dello stabilimento (Figura 186). Una serie di sensori piezoresistivi controllano le altezze delle acque raccolte nei bacini e, in caso del superamento dei livelli di soglia prestabiliti, allertano direttamente i Responsabili di Cava.

Le acque, trasportate in superficie attraverso una serie di tubazioni (Figura 187), venivano raccolte in due differenti vasche di sedimentazione localizzate presso i due imbocchi della cava (Figura 188).



Figura 185: Telecamera per il controllo dei livelli idrici nei principali bacini



Figura 186: Monitor presso gli uffici della Fassa SpA per il controllo dei livelli idrici dei principali bacini di raccolta



Figura 187: Tubazioni per il trasporto delle acque dai bacini alle vasche di sedimentazione

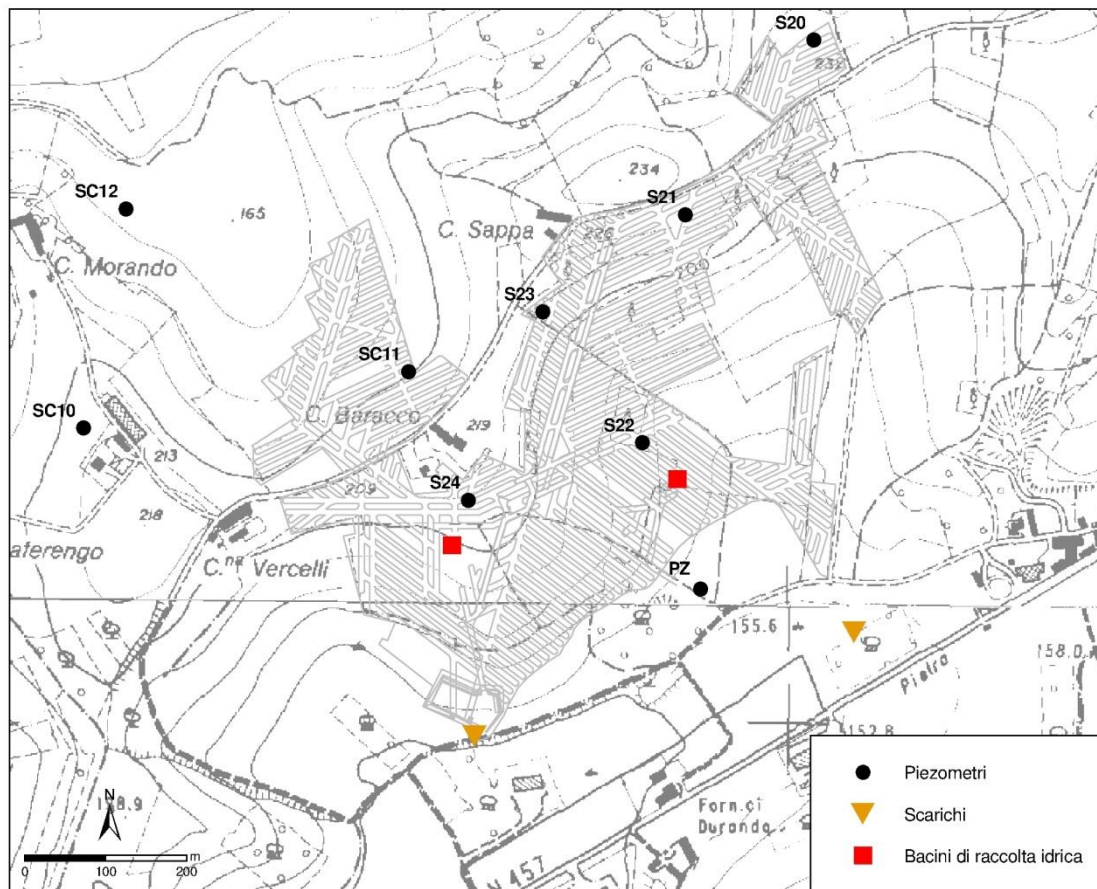


Figura 188: Ubicazione dei bacini di raccolta delle acque e degli scarichi

Attualmente, data la torbidità nulla delle acque in uscita dalla cava, le vasche di sedimentazione sono state dismesse.

La sedimentazione dello scarso materiale in sospensione avviene presso i due principali bacini di raccolta. Le acque vengono quindi condottate verso due scarichi (Figura 189 e Figura 190), collegati alla rete di drenaggio principale (Rio Valle Pietra) mediante due differenti canalizzazioni.



Figura 189: Scarico presso l'imbocco Est



Figura 190: Scarico presso l'imbocco Ovest

Le portate degli scarichi sono state controllate e rilevate manualmente ogni mese a partire da gennaio per tutto l'anno 2010 da parte del personale della Fassa SpA (Tabella 21), mentre nell'anno 2011 e 2012 i rilevamenti del flusso idrico sono stati molto più radi avendo anche constatato la notevole costanza dei flussi desunti dalle portate di emungimento delle pompe utilizzate (Tabella 22).

Come si può evincere, da questi dati, il flusso è progressivamente aumentato, allo scarico dell'imbocco Est, col procedere degli scavi fino a raggiungere un valore massimo di 70 l/s per poi stabilizzarsi intorno ai 50 l/s. Allo scarico dell'imbocco Ovest le prime misure sono state effettuate a partire da ottobre 2011 ed hanno fornito un valore massimo di 15 l/s (10/10/2011) per poi ridursi a circa 11 l/s (10/12/2011) e a 10 l/s nel 2012. Le misure relative alle portate degli scarichi sono state più rade nel 2011 e 2012 anche per la difficoltà di eseguire tali misure (sistema a volume noto) in quanto detti scarichi sono stati direttamente collegati alla rete idrica superficiale.

Tabella 21: Portate emunte nell'anno 2010 [l/s]

	Imbocco EST	Imbocco OVEST
<i>Gennaio</i>	0	0
<i>Febbraio</i>	3	0
<i>Marzo</i>	8	0
<i>Aprile</i>	12	0
<i>Maggio</i>	18	0
<i>Giugno</i>	22	0
<i>Luglio</i>	24	0
<i>Agosto</i>	30	0
<i>Settembre</i>	35	0
<i>Ottobre</i>	45	0
<i>Novembre</i>	50	0
<i>Dicembre</i>	55	0

Tabella 22: Portate emunte nell'anno 2011- 2012 presso gli imbocco Est e Ovest

Ubicazione	Data	Portata (l/s)
Bacino OVEST	Ottobre 2011	15
Bacino OVEST	Dicembre 2011	11
Bacino OVEST	Maggio 2012	10
Bacino OVEST	Ottobre 2012	10
Bacino EST	Febbraio 2011	60
Bacino EST	Maggio 2011	70
Bacino Est	Dicembre 2011	60
Bacino Est	Maggio 2012	50
Bacino Est	Ottobre 2012	50

Sulla base della situazione idrogeologica dell'area di Calliano si presume che le portate emunte dalla cava "Franca" si ridurranno nel tempo stabilizzandosi, ad esaurimento della riserva geologica, intorno a un valore di 10-20 l/s che rappresenta l'apporto idrico infiltrativo competente l'area di drenaggio intorno la cava.

Le acque intercettate durante i lavori di scavo e quelle relative ai due scarichi principali sono state campionate tra il 2010 ed il 2013 ed analizzate presso il Laboratorio di Ricerche Idrogeologiche del Politecnico di Torino (DIATI) (Tabella 23 e Tabella 24).

Così come per le acque di scarico di Moncalvo anche per la cava in esame si ravvisano valori di solfati eccedenti il limite imposto dalla legge (1000 mg/l).

Anche nella zona di Calliano una campagna di campionamenti e successive analisi ha mostrato che il valore di base dei solfati nelle acque circostanti la cava si attesta intorno ai 1000 mg/l evitando così, ai gestori della cava, il trattamento delle acque prima dello scarico.

Tabella 23: Analisi chimiche effettuate sulle acque di scarico della cava di Calliano

CODICE	Data	Eh	pH	T [°C]	CE a 25°C [mS/cm]	TH [°f]	Sodio [mg/l]	Ammoni o [mg/l]	Potassio [mg/l]	Calcio [mg/l]	Magnesi o [mg/l]	Fluoruri [mg/l]	Cloriti [mg/l]	Bromati [mg/l]	Cloruri [mg/l]	Nitriti [mg/l]	Bromuri [mg/l]	Nitrati [mg/l]	Fosfati [mg/l]	Solfati [mg/l]	Bicarbona ti [mg/l]	TDS [mg/l]
SCE1	4-giu-10	62	6,89	14,38	2830	183,0	23,010	< 0,010	2,839	653,380	48,226	0,500	< 0,020	< 0,005	36,995	0,090	< 0,010	18,675	0,080	1444,350	376,469	2604,614
SCE2	21-dic-10	23	7,49	12,40	2340	182,7	24,638	< 0,010	3,561	653,600	47,440	0,460	< 0,020	< 0,005	35,995	0,050	0,245	13,200	< 0,010	1447,875	371,648	2598,711
SCE3	28-apr-11	-60	7,40	13,84	2670	180,5	24,878	< 0,010	2,903	646,890	46,080	0,321	< 0,020	< 0,005	36,110	0,095	< 0,010	17,750	< 0,010	1454,380	372,844	2602,251
SCE4	26-set-11	71	8,19	18,61	2669	184,3	32,190	0,240	10,012	656,190	49,610	0,500	< 0,020	< 0,005	70,640	< 0,005	< 0,010	46,900	< 0,010	1453,449	376,267	2695,998
SCE5	dic-11	195	7,42	12,30	2810	184,9	37,280	0,070	9,492	646,260	57,250	0,620	< 0,020	< 0,005	64,796	0,153	< 0,010	3,405	< 0,010	1444,429	373,162	2636,917
SCE6	25-lug-13	69	7,20	13,80	2770	185,4	41,315	0,089	10,735	647,290	57,738	0,503	< 0,020	< 0,005	65,647	< 0,005	< 0,010	16,210	< 0,010	1471,920	389,191	2700,638
SCW1	28-apr-11	23	6,80	13,34	2759	176,1	44,565	< 0,010	3,544	631,190	44,820	0,214	< 0,020	< 0,005	43,121	< 0,005	< 0,010	18,565	< 0,010	1436,460	347,230	2569,709
SCW2	26-set-11	60	7,35	16,46	1741	195,4	99,570	0,417	5,309	636,390	88,550	0,320	< 0,020	< 0,005	172,073	< 0,005	< 0,010	40,420	0,400	1547,578	351,013	2942,039
SCW3	dic-11	195	7,03	11,70	3420	188,9	131,500	< 0,010	10,972	659,650	58,686	0,585	< 0,020	< 0,005	190,979	0,050	< 0,010	1,994	< 0,010	1549,300	364,888	2968,604
SCW4	25-lug-13	135	7,00	14,70	3890	197,9	208,820	0,061	14,196	707,410	51,663	0,356	< 0,020	< 0,005	319,736	< 0,005	< 0,010	7,520	< 0,010	1603,000	385,286	3298,048

Tabella 24: Analisi chimiche effettuate sulle acque di scarico della cava di Calliano

CODICE	Data	Li (ppb)	Al (ppb)	V (ppb)	Cr (ppb)	Mn (ppb)	Fe (ppb)	Co (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	Ga (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Rb (ppb)	Sr (ppb)	Ag (ppb)	Cd (ppb)	Cs (ppb)	Ba (ppb)	Tl (ppb)	Pb (ppb)	Bi (ppb)	U (ppb)
SCE1	4-giu-10		1365,00	< 1	1,19	1,33	37,19	< 1	2,78	1,53	25,86	< 1	< 1	3,71	2,41	16930,00	< 1	< 1	< 1	6,10	< 1	< 1	< 1	4,64
SCE2	21-dic-10	18,37	3,70	< 1	1,09	1,83	18,00	< 1	3,05	1,10	5,41	< 1	1,02	6,64	2,01	14070,00	< 1	< 1	< 1	5,74	< 1	< 1	< 1	5,70
SCE3	28-apr-11	25,50	< 1	< 1	< 1	< 1	114,90	< 1	< 1	< 1	1,78	< 1	< 1	4,36	1,50	12370,00	< 1	< 1	< 1	5,20	< 1	< 1	< 1	7,00
SCE4	26-set-11	24,55	14,89	< 1	1,29	< 1	36,10	< 1	2,26	< 1	3,34	< 1	2,06	10,03	1,99	12360,00	< 1	< 1	< 1	5,98	< 1	< 1	< 1	6,86
SCE5	dic-11																							
SCE6	25-lug-13	31,74	13,17	< 1	1,32	20,35	26,48	< 1	5,17	1,28	7,88	< 1	4,05	18,51	3,21	9278,00	< 1	< 1	< 1	8,33	< 1	< 1	< 1	10,05
SCW1	28-apr-11	26,66	26,17	< 1	1,18	5,01	55,82	< 1	1,01	< 1	2,65	< 1	3,14	13,20	2,05	12920,00	< 1	< 1	< 1	5,79	< 1	< 1	< 1	5,90
SCW2	26-set-11	43,70	831,10	3,73	2,22	563,90	645,60	2,45	18,83	3,82	53,17	< 1	7,81	30,89	5,05	12540,00	< 1	< 1	< 1	17,44	< 1	2,44	< 1	5,54
SCW3	dic-11																							
SCW4	25-lug-13	38,55	11,33	< 1	< 1	874,00	23,60	< 1	15,33	1,17	36,69	< 1	27,63	120,50	6,24	10680,00	1,59	< 1	< 1	9,75	< 1	< 1	< 1	8,48

8.3. ACQUIFERO IMPOSTATO NEL MASSICCIO DEL COLLE DI TENDA

8.3.1. PREMESSA

L'interazione tra uno scavo in sotterraneo e un acquifero alimentante una sorgente le cui acque sono destinate al consumo umano può comportare oltre alle interferenze finora già descritte anche problemi legati all'inquinamento della sorgente stessa.

Nei prossimi paragrafi verrà approfondito il caso studio relativo al raddoppio della galleria stradale del Col di Tenda, opera ancora in attesa di realizzazione: dopo un breve inquadramento territoriale e un approfondimento sui risultati emergenti dai dati di monitoraggio dei livelli piezometrici si analizzerà la potenziale interferenza legata all'inquinamento della sorgente di Tenda da parte delle miscele cementizie utilizzate per il consolidamento della galleria.

Per far fronte a tale potenziale interferenza sono stati condotti dei test per individuare dei potenziali indicatori della presenza di cemento in acqua.

8.3.2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il Colle di Tenda è un valico alpino alla quota di 1.871 metri s.l.m. che separa le Alpi liguri dalle Alpi Marittime. La sua sommità divide la valle del Roia a sud con quella del Vermentina a nord, ed è situato tra le regioni del Piemonte e della Provenza-Alpi-Costa Azzurra.

I primi tentativi di realizzazione di un tunnel per il raggiungimento delle coste Liguri risalgono al 1614. I lavori che consegnarono il traforo stradale attuale (di 3.182 m) furono ultimati solo nel 1882 dopo non poche difficoltà.

La galleria stradale serve la attuale statale SS20 che prende il nome di E74 una volta giunta in Francia.

Il traforo Ferroviario (8.099 m) fu ultimato più tardi, nel 1898 e con notevoli difficoltà legate a problemi geologici e idrogeologici incontrati durante le operazioni di scavo. Dal lato italiano infatti i geologi e gli operatori dovettero fronteggiare le numerose e copiose vene d'acqua in pressione, mentre dal lato francese le difficoltà furono determinate dall'intercettamento di numerosi orizzonti di argille piuttosto fluidificate che resero l'avanzamento pericoloso e problematico.

In Figura 191 si può osservare una foto satellitare della zona circostante il Colle di Tenda.

In Figura 192 è presente un particolare della zona interessata dallo studio. Si possono osservare gli imbocchi delle due gallerie e la proiezione, sul piano campagna, della sorgente di Tenda che affianca la galleria ferroviaria e che da essa prende avvio lateralmente (Pagliano, 2008).

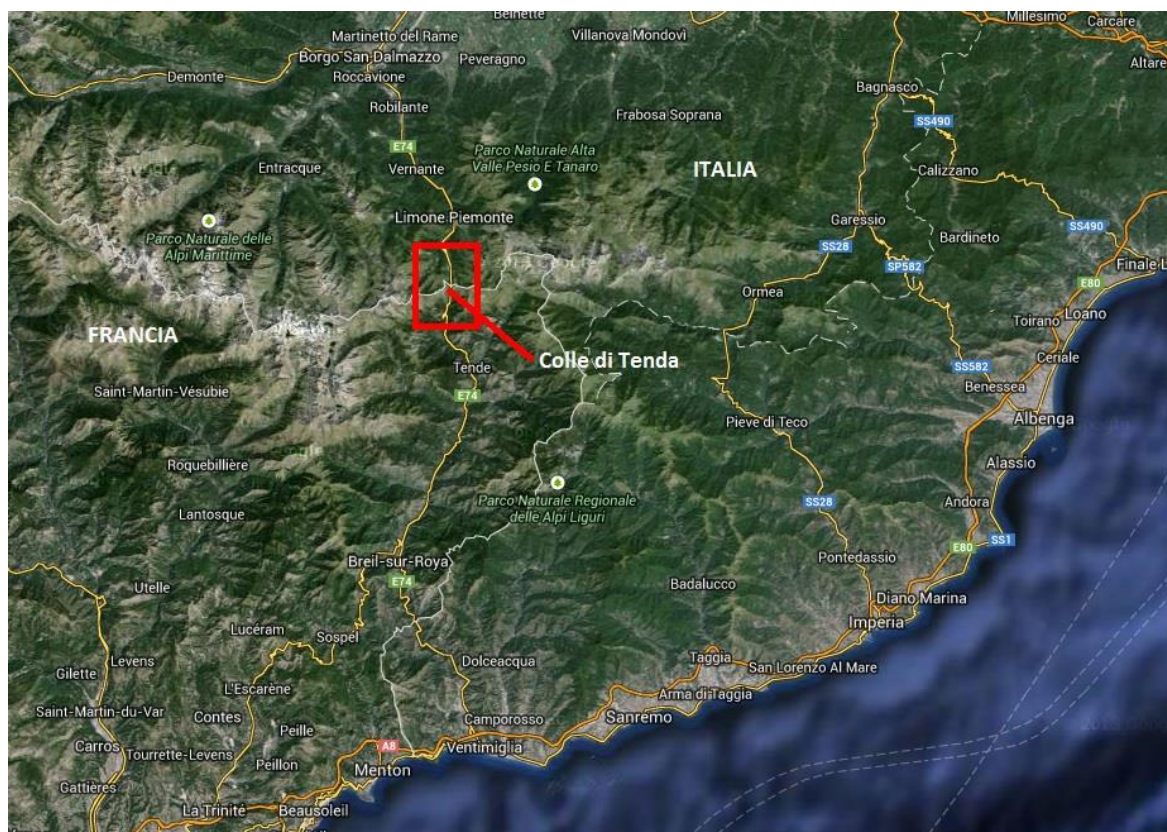


Figura 191: Inquadramento geografico della zona in studio

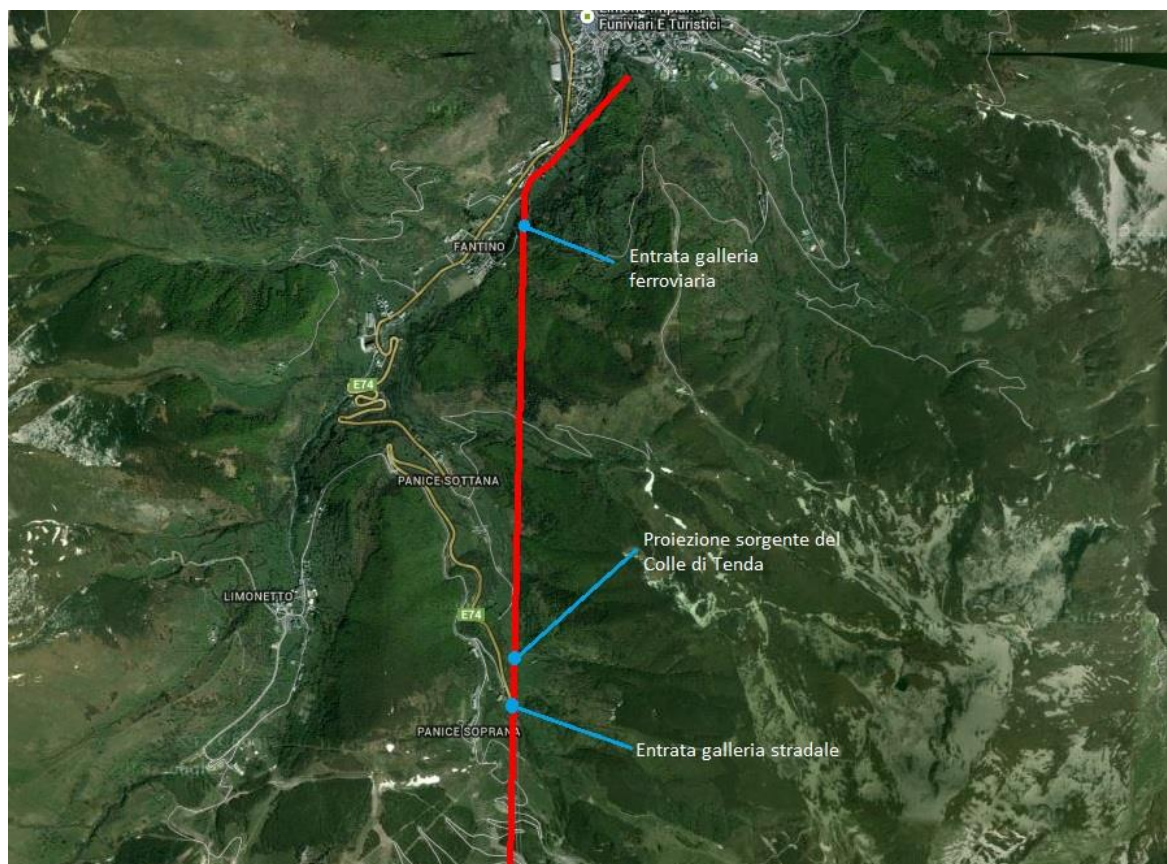


Figura 192: Particolare in cui si può osservare la zona in esame. Nell'immagine aerea sono evidenziate le entrate delle due gallerie, la proiezione della sorgente sul piano campagna e il tracciato della galleria ferroviaria.

8.3.1. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

L'assetto idrostratigrafico dell'area del Colle di Tenda è costituito essenzialmente dai seguenti complessi:

Complesso detritico-morenico (Quaternario gen.), costituito da limi, limi sabbiosi, ghiaie e trovanti ed in genere da depositi detritici di versante. La permeabilità piuttosto variabile passando da valori piuttosto ridotti dei litotipi prevalentemente limosi a valori decisamente elevati per le porzioni prevalentemente detritiche.

Complesso flyschoidale superiore (Eocene), costituito da alternanze di argilliti prevalenti con locali intercalazioni arenacee e caratterizzato da una permeabilità molto ridotta. Nelle zone caratterizzate da una elevata fratturazione, la permeabilità è decisamente maggiore, con valori relativi fino a medi.

Complesso calcareo superiore (Trias - Eocene), costituito da calcari marnosi stratificati, calcareniti, conglomerati poligenici cementati (Eocene); calcari e calcari dolomitici (Giurassico). Il complesso è dotato di una permeabilità piuttosto elevata legata ad una intensa fratturazione ed ad una ridotta carsificazione. Nei litotipi eocenici, in genere, la fratturazione è minore, ma il grado di carsificazione delle discontinuità è maggiore.

Complesso argillitico – evaporitico (Trias), costituito da argilliti policrome, brecce, carnirole, locali lenti gessose, brecce calcaree e livelli calcarei dolomitici. La permeabilità è in genere molto ridotta, ad eccezione degli orizzonti più grossolani, dove raggiunge un grado di permeabilità maggiore. Tale orizzonte è caratterizzato da uno spessore molto variabile, condizionato dall'importante piano di sovrascorrimento che separa la Falda Sub-Brianzone da serie autoctone del Dominio Esterno Delfinese.

Complesso flyschoidale inferiore (Eocene), costituito da peliti ed argilliti con arenarie con fitta stratificazione. La permeabilità è in genere piuttosto ridotta, ad eccezione degli orizzonti fratturati e cataclastici che spesso presentano una certa circolazione d'acqua.

Complesso carbonatico inferiore (Trias - Cretacico), costituito da calcari, calcari marnosi, calcari puri, calcari dolomitici e dolomie. Il complesso è dotato di una permeabilità piuttosto elevata per fratturazione e carsismo.

Complesso evaporitico (Trias) costituito da potenti ammassi di gessi, anidriti e carnirole con geometrie molto variabili in spessore ed estensione. La permeabilità può essere anche elevata nei settori caratterizzati da un carsismo piuttosto evoluto, mentre nei settori relativamente compatti e poco fratturati la permeabilità risulta essere piuttosto bassa. Sulla base delle osservazioni effettuate nella galleria stradale esistente, l'ammasso gessoso-anidritico risulta essere poco acquifero mentre l'orizzonte delle carnirole presenta una notevole circolazione idrica impostata nelle discontinuità principali e nella rete carsica.

I principali acquiferi che verranno intercettati durante la realizzazione dell'opera sono l'acquifero nel Complesso calcareo superiore e quello nel Complesso evaporitico. Tuttavia anche gli altri complessi rilevati presentano locali circolazioni idriche modeste, generalmente impostate in corrispondenza di zone maggiormente fratturate che potrebbero condizionare la stabilità dei materiali intercettati durante lo scavo. In particolare la presenza di miloniti, cataclasti ed orizzonti argillitici, unitamente alla modesta circolazione idrica potrebbero causare locali problemi di fluidificazione dei materiali.

Il principale acquifero che alimenta la zona acquifera intercettata dalla galleria ferroviaria è impostato nel Complesso calcareo superiore che presenta una permeabilità piuttosto elevata per intensa fratturazione e locale presenza di carsismo.

L'assetto idrostrutturale dell'area è condizionato dalla presenza di una principale superficie di sovrascorrimento, immergente a NE, che divide la serie sedimentaria autoctona del *Dominio Esterno Delfinese* dalla *Falda Sub-Brianzonese*. Tale superficie è dislocata da numerose discontinuità tettoniche sub-verticali che complicano notevolmente la geometria di questo contatto. Inoltre, all'interno del *Dominio Esterno Delfinese* sono presenti diverse superfici di discontinuità, immergenti ancora verso NE, tra il Complesso flyschoidale ed il Complesso evaporitico.

Nella successione della *Falda Sub-Brianzonese* il Complesso carbonatico superiore, che ospita il principale acquifero, è in contatto con il sottostante Complesso argillitico-evaporitico interessato dal piano di scorrimento e, pertanto, caratterizzato da notevoli deformazioni con variazioni di spessore. Tale orizzonte condiziona la circolazione idrica sotterranea verso la Sorgente di Tenda.

Il Complesso flyschoidale superiore, sovrastante il Complesso carbonatico superiore, costituisce un'importante soglia di permeabilità sovrimposta che dà origine ad una potente zona di carso saturo facente parte dell'idrostruttura alimentante la sorgente principale.

Un'ampia porzione dell'idrostruttura in esame è interessata dalla presenza del Complesso detritico-morenico, in grado di immagazzinare considerevoli quantitativi di acqua che poi cede all'acquifero carbonatico sottostante.

Sulla base dell'assetto idrostrutturale individuato, l'area di alimentazione del sistema della Sorgente del Colle di Tenda si sviluppa in corrispondenza di una ristretta fascia di rocce carbonatiche lunga circa 11 km, in direzione grossomodo SE-NO.

La superficie interessata è di circa 7 km², partendo dalla Valle Grande, comprende gli ammassi calcarei del Bric Brusata, di Bec Baral e Bec Matlas. Nella regione compresa fra Bric Brusata e Bec Baral si trova l'ampio vallone della Creusa, in cui è stato individuato un inghiottitoio che tuttavia non sembra essere connesso al flusso profondo. Poco a valle del punto in cui le acque del rio si infiltrano fra i depositi detritico-morenici, si trova, infatti, una scaturigine che con ogni probabilità è data dal riaffiorare delle stesse acque.

Al fine di verificare la presenza di eventuali apporti derivanti da perdite in sub-alveo del torrente Rio Prati della Chiesa, sono state effettuate, presso l'abitato di Limonetto, misure di portata a monte e a valle dell'ipotetica zona di rilascio, posta in corrispondenza della fascia carbonatica appartenente all'idrostruttura e attraversata perpendicolarmente dal suddetto corso d'acqua.

I valori ottenuti, valutati in 219 l/s a monte e in 281 l/s a valle, con un aumento di portata di 62 l/s, evidenziano unicamente l'apporto del troppo pieno dell'acquedotto di Limone Piemonte, ubicato presso l'abitato di Limonetto e del contributo proveniente dai versanti detritici sovrastanti. Tali misure hanno evidenziato l'assenza di perdite del torrente Rio Prati della Chiesa e che quindi questo corso d'acqua risulta essere totalmente indipendente dalla circolazione profonda che alimenta la Sorgente di Tenda.

Il limite sud-orientale della struttura interessa parte del vallone di Cabanaira ed i versanti NW di Cima Beccorosso. Le rocce carbonatiche costituenti quest'ultimo rilievo, sono invece stati esclusi dalla struttura del Colle di Tenda in quanto non si conosce la loro continuità con la struttura principale, a causa della potente copertura detritica quaternaria.

Infine, alla quota di 1560 m s.l.m., nel vallone della Cabanaira, si è scoperta l'esistenza di un inghiottitoio con una ridotta capacità di assorbimento. Nel giorno in cui è stato ispezionato per la prima volta (5 ottobre 2004), si è osservato infatti la scomparsa di un flusso idrico di pochi litri al secondo, mentre durante il secondo sopralluogo (novembre 2005), con una portata di diverse decine di l/s, l'assorbimento era quasi del tutto trascurabile.

Ad eccezione di questi due punti idrovori in precedenza descritti, l'idrostruttura carbonatica viene alimentata direttamente dalle precipitazioni che si verificano nell'area assorbente e dallo scioglimento dello spesso manto nevoso che caratterizza la stagione invernale-primaverile. Una rilevante parte della ricarica sembra provenire anche dai travasi del complesso detritico-morenico che cede lentamente ai calcari sottostanti le acque assorbite da tali depositi.

8.3.2. LA SORGENTE DI TENDA

Dalla documentazione raccolta (Baldacci e Franchi, 1900; Sacco, 1905), risulta che tra la progressiva 2489 e 3058 m dall'imbocco Nord della galleria ferroviaria, si incontrò una potente serie carbonatica composta da calcari giuresi ed eocenici molto permeabili, che sosteneva portate dell'ordine dei 400 l/s, in media. L'acquifero fu intercettato nella zona in cui si trova il contatto tra il Complesso calcareo superiore ed il Complesso flyschoidale superiore.

Le scaturigini sono, dunque, da attribuirsi alla presenza di una soglia di permeabilità sovrainposta, dovuta alla presenza del Complesso flyschoidale superiore posto al tetto dei calcari giurassici (Figura 193, Figura 194, Figura 195).

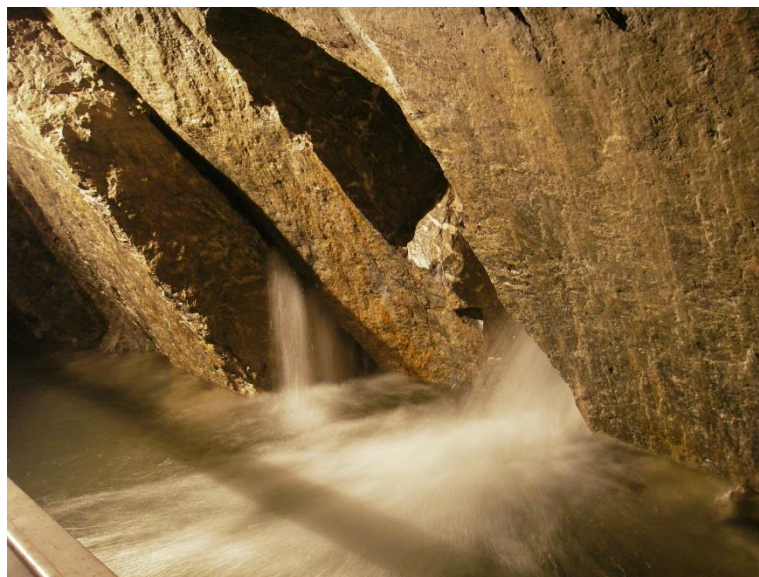


Figura 193: Venute idriche dall'ammasso fratturato che originano la Sorgente di Tenda

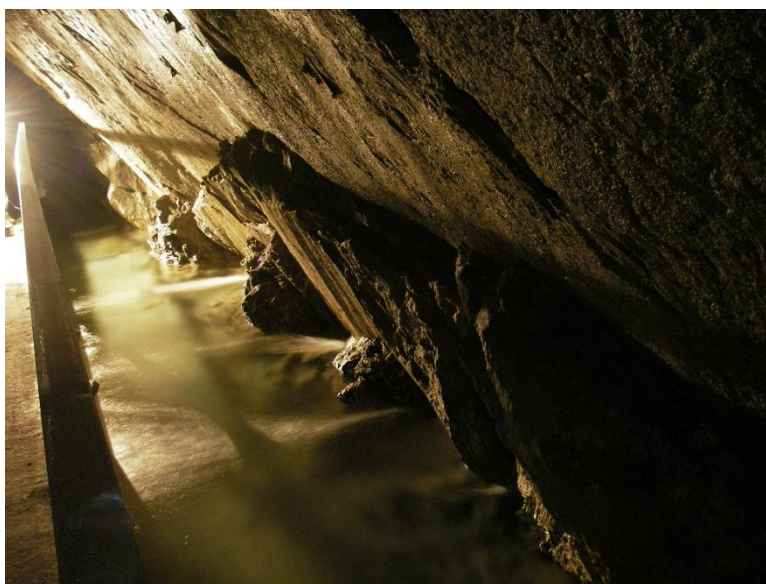


Figura 194: Galleria di captazione della Sorgente di Tenda

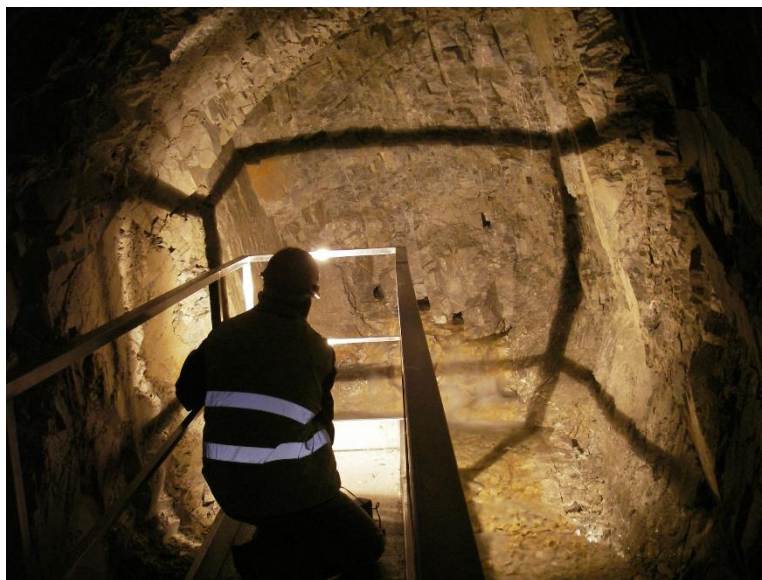


Figura 195: Fronte di scavo della captazione della Sorgente di Tenda

La violenza dei getti d'acqua che scaturivano dalla roccia causarono non pochi problemi e notevoli ritardi all'esecuzione dei lavori, che rimasero bloccati per circa 3 anni, finché non si riuscì a convogliare le diverse venute d'acqua in un canale che andava a scaricarsi nel Torrente Vermenagna.

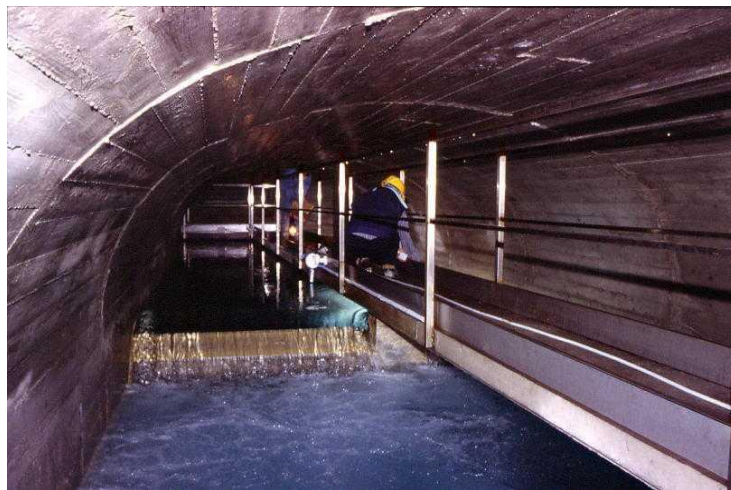


Figura 196: Parte terminale dell'opera di captazione con relativo stramazzo..



Figura 197: Vasche di carico nell'impianto di Limone Piemonte.

Nel 1990 fu dato il via ad una serie di lavori commissionati dal Consorzio per l'Acquedotto delle Langhe e delle Alpi Cuneesi, con lo scopo di captare la sorgente. Il progetto, basato sui dati noti, incontrò alcune difficoltà poiché la risorsa disponibile risultava molto inferiore alle aspettative. Le acque, finalmente condottate (Figura 196 e Figura 197), furono avviate ad un partitore sito in Limone Piemonte. Tale sorgente costituisce la principale risorsa di questo importante consorzio acquedottistico che distribuisce l'acqua ad un esteso settore della provincia di Cuneo interessante l'intera zona delle Langhe e del Roero ed anche in alcuni comuni nelle province limitrofe (Savona ed Asti). L'elevata quota relativa all'ubicazione delle suddette vasche di carico permette di trasferire tale risorsa idrica fino ai rilievi collinari di Mombarcaro (circa 900 m s.l.m.) senza l'impiego di pompe (Figura 198).



Figura 198: La rete dell'acquedotto delle Langhe e delle Alpi cuneesi

8.3.3. MONITORAGGIO IDROGEOLOGICO

Lo studio relativo alla situazione idrogeologica del settore del Col di Tenda inerente alla realizzazione del raddoppio del traforo stradale è stato eseguito attraverso una serie di indagini che hanno interessato alcuni punti d'acqua costituiti da:

- sorgente presente nella galleria ferroviaria (Sorgente del Col di Tenda),
- vasca di carico dell'Acquedotto delle Langhe e Alpi Cuneesi ubicata presso l'abitato di Limone Piemonte (CN),
- una serie di piezometri posti in corrispondenza del futuro tracciato del traforo (SI3, SA, SA2, SB ed SC),
- alcune venute idriche presenti nella galleria stradale esistente.

Le indagini sono state espletate attraverso:

- installazione di acquisitori automatici di livelli, temperatura e conducibilità elettrica specifica delle acque e torbidità,
- campionamenti di acque e relative analisi chimiche

Nel presente paragrafo verranno descritti solo gli aspetti principali emersi da questo studio.

8.3.3.1. MISURE PIEZOMETRICHE IN CORRISPONDENZA DEL FUTURO TRACCIATO

I piezometri SB ed S13 interessano proprio l'acquifero carbonatico che verrà intercettato dallo scavo della nuova galleria ed è su questi che verrà concentrata l'analisi dei livelli piezometrici, grazie ad acquisitori automatici di livello ubicati all'interno degli stessi (Figura 199).

Durante lo scavo del sondaggio, attrezzato poi a piezometro SI3, furono incontrati i primi orizzonti acquiferi a quota 1346 m s.l.m. e con la realizzazione del piezometro, il livello idrico si è attestato a -171 m, quindi ad una quota di 1336 m s.l.m. Successivamente furono effettuate altre misure che hanno evidenziato notevoli oscillazioni dei livelli acquiferi, talvolta superiore anche di 20 m. In occasione della misura effettuata il 7/12/2004 il livello di saturazione raggiungeva infatti i 1360 m s.l.m.

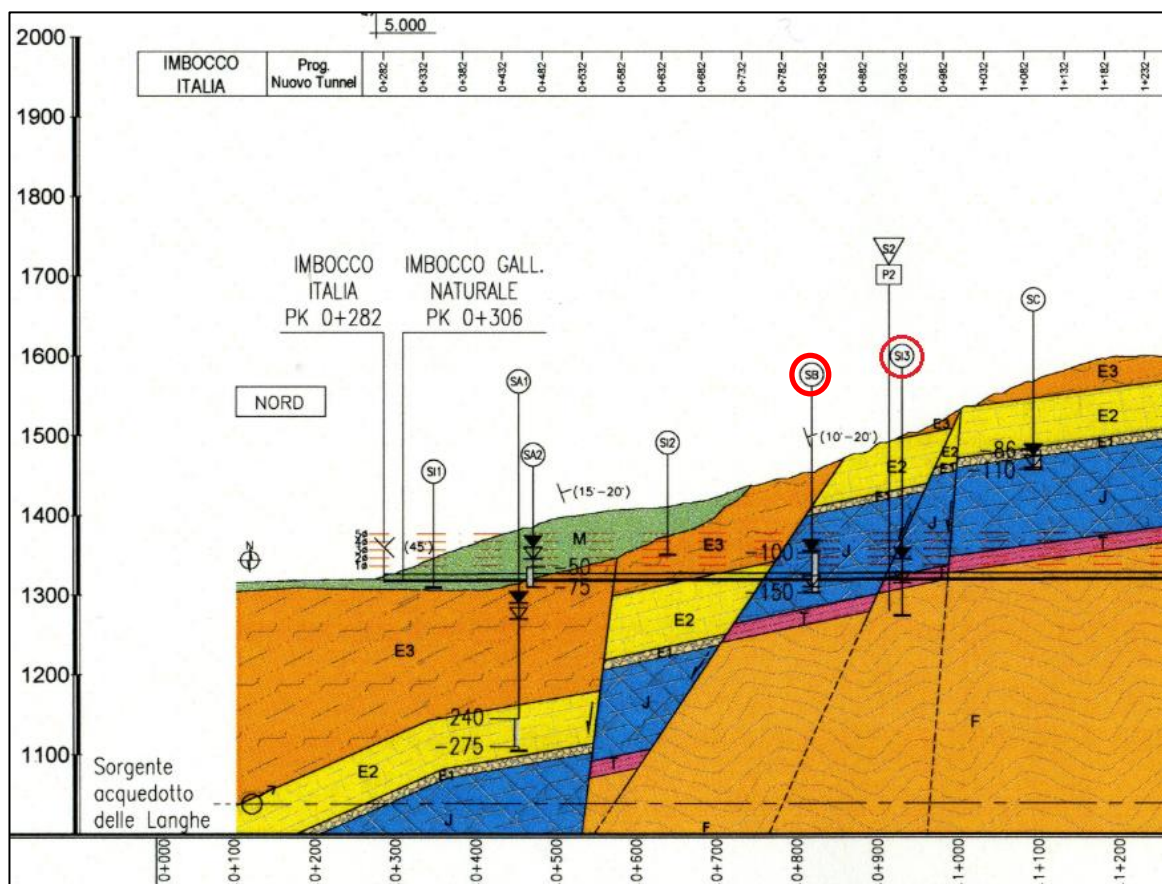


Figura 199: Stralcio della sezione geologica in cui è evidenziata l'ubicazione del sondaggio SI3

Il monitoraggio effettuato, fino ad un guasto strumentale verificatosi nell'estate del 2010, permette di avere delle indicazioni molto precise sugli andamenti dei livelli piezometrici in relazione alla quota a cui la galleria verrà realizzata. Nel grafico di Figura 200, e nel dettaglio di Figura 201, sono riportati gli andamenti dei livelli idrici misurati nei due piezometri in relazione alla quota della futura opera. Pur interessando il medesimo acquifero ad una distanza molto ridotta, i due piezometri presentano un andamento temporale piuttosto differente che evidenzia l'esistenza di un **acquifero molto eterogeneo** caratterizzato da settori a maggiore permeabilità - sottolineati dalle rapide risposte alle precipitazioni (comportamento di tipo impulsivo) e da zone a minore permeabilità con curve di decremento dei livelli piuttosto blande. Dal grafico è inoltre possibile osservare come nei periodi invernali e tardo estivi la quota piezometrica dell'acquifero si livella al di sotto del piano di scavo, mentre in occasione di rilevanti apporti (fusione nivale o precipitazioni abbondanti) il battente idraulico può arrivare ad una trentina di metri al di sopra della quota del piano stradale.

Nel grafico di Figura 202 si riporta la risposta del livello piezometrico, in seguito ad un evento infiltrativo, nei due piezometri SI3 e SB: risulta piuttosto evidente il **comportamento impulsivo** dell'acquifero.

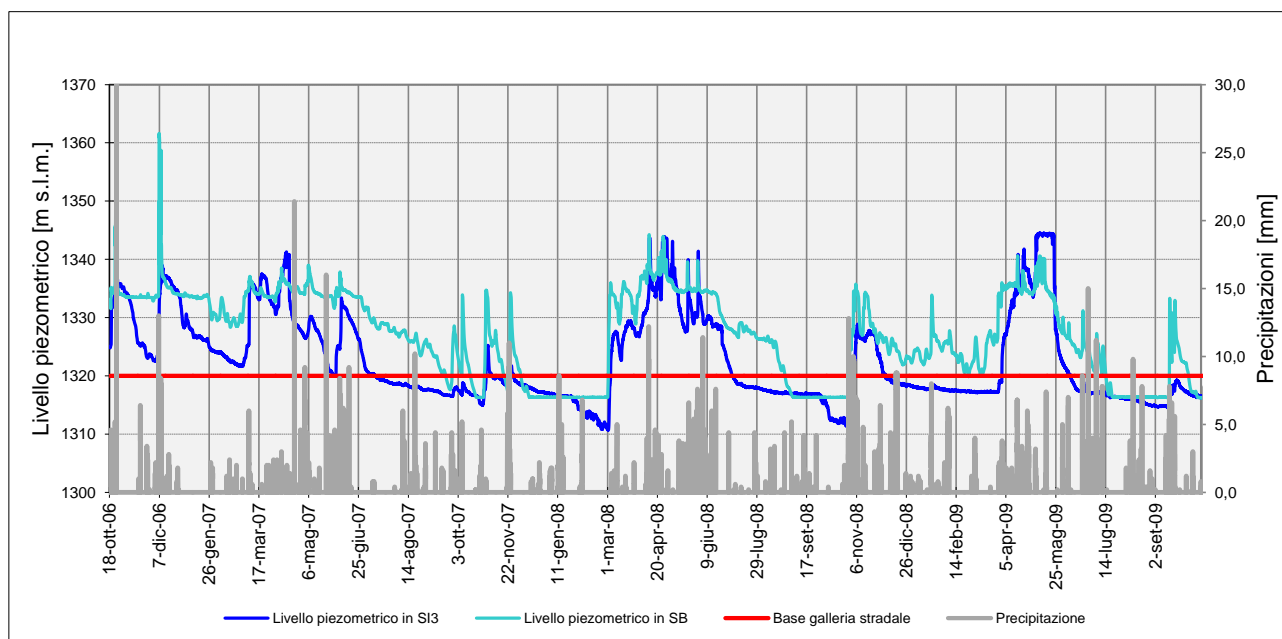


Figura 200: Confronto degli andamenti dei livelli nei piezometri SI3 e SB in relazione alla quote base della futura opera

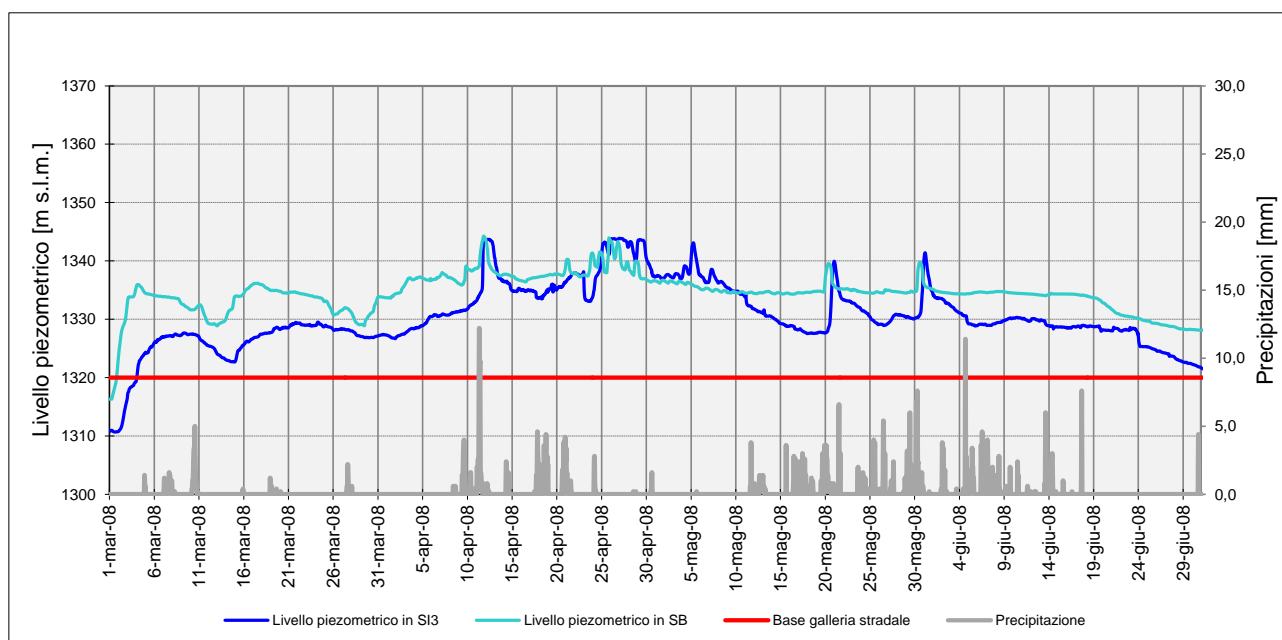


Figura 201: Dettaglio del confronto degli andamenti dei livelli nei piezometri SI3 e SB in relazione alla quote base della futura opera

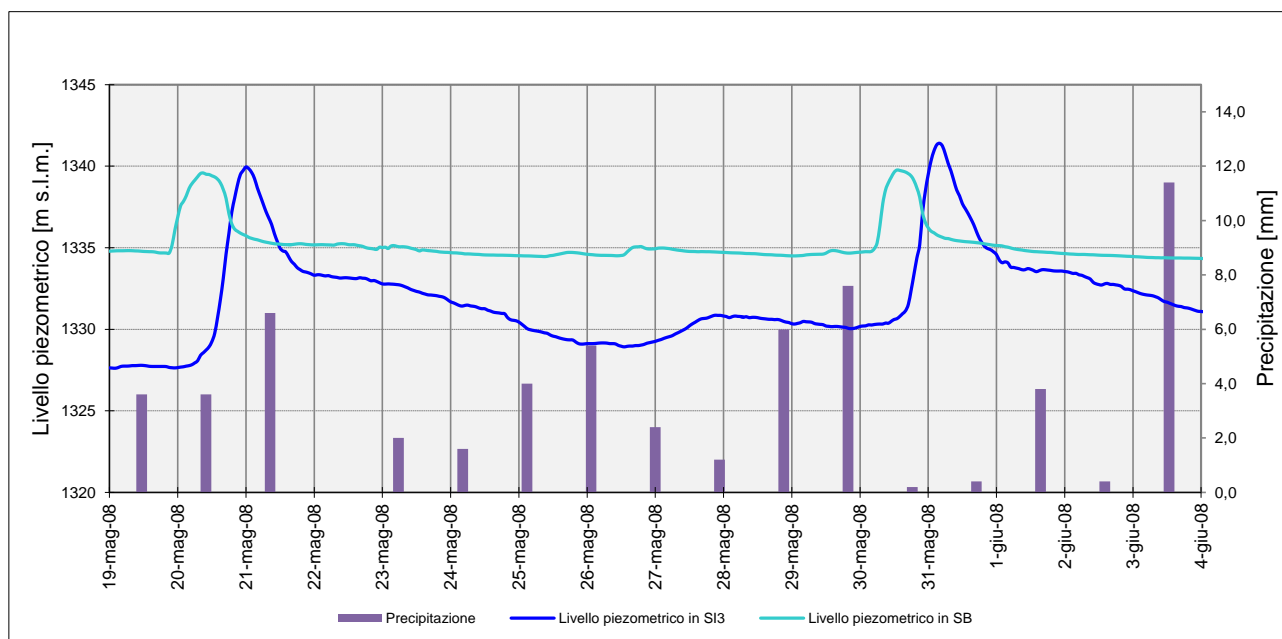


Figura 202: Confronto degli andamenti dei livelli nei piezometri SI3 e SB in seguito ad un apporto infiltrativo

8.3.3.2. STUDIO DELLA RISPOSTA CHIMICO-FISICA

Presso la captazione, ubicata all'interno della galleria ferroviaria del Col di Tenda, un acquisitore automatico ha registrato i valori di portata, conducibilità elettrica e temperatura.

I dati idrodinamici sembrano evidenziare un comportamento dell'acquifero caratterizzato da notevole inerzia con importanti fenomeni di pistonaggio e circolazioni piuttosto lente nell'ammasso roccioso (Figura 203, Figura 204, Figura 205).

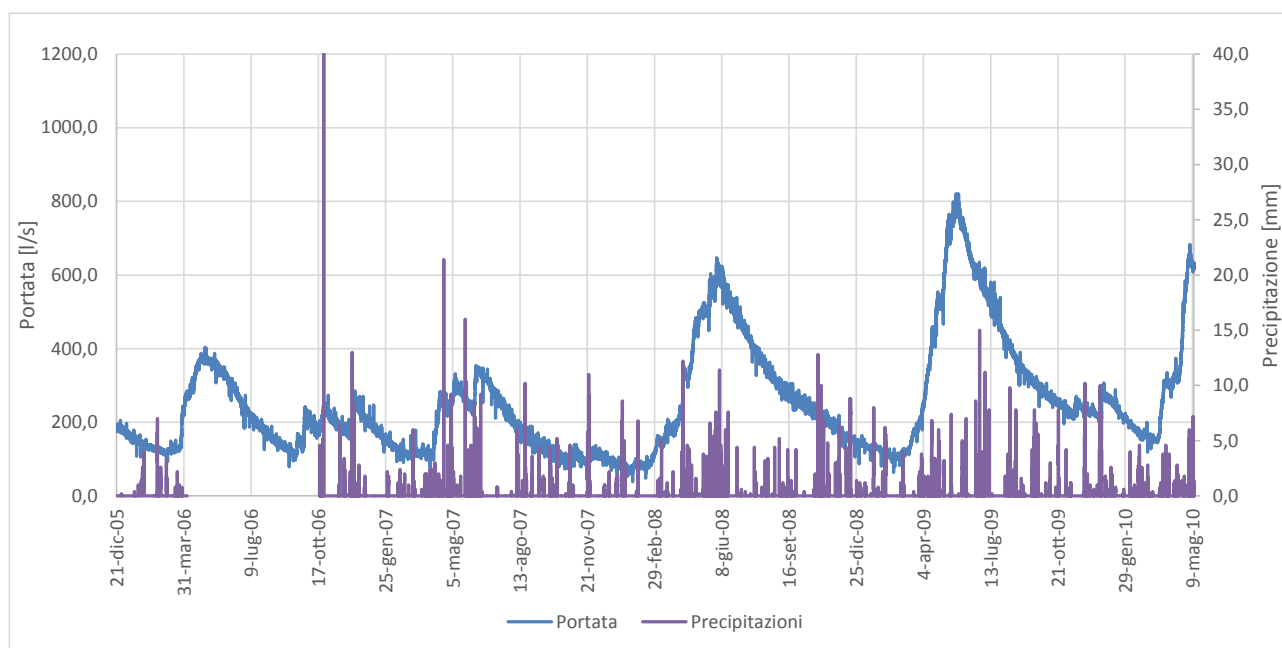


Figura 203: Andamento della portata della sorgente del Tenda in relazione alle precipitazioni

La conducibilità elettrica specifica (Figura 204) presenta variazioni più marcate direttamente collegate con gli andamenti delle portate. Il grafico mostra incrementi repentini della conducibilità elettrica durante la prima fase delle piene seguiti da altrettanto rapide diminuzioni che evidenziano un fenomeno di pistonaggio (Vigna, 2002) legato all'arrivo di acque piuttosto mineralizzate presenti nell'acquifero. A tale picco segue un temporaneo decremento della conducibilità elettrica che presenta un minimo generalmente in corrispondenza del picco di piena. Questa diminuzione non è legata all'arrivo diretto di acque di neoinfiltrazione, caratterizzate da una mineralizzazione molto bassa, bensì da apporti sotterranei provenienti da settori diversi dell'idrostruttura in esame.

Nel grafico di Figura 205 viene riportato un dettaglio.

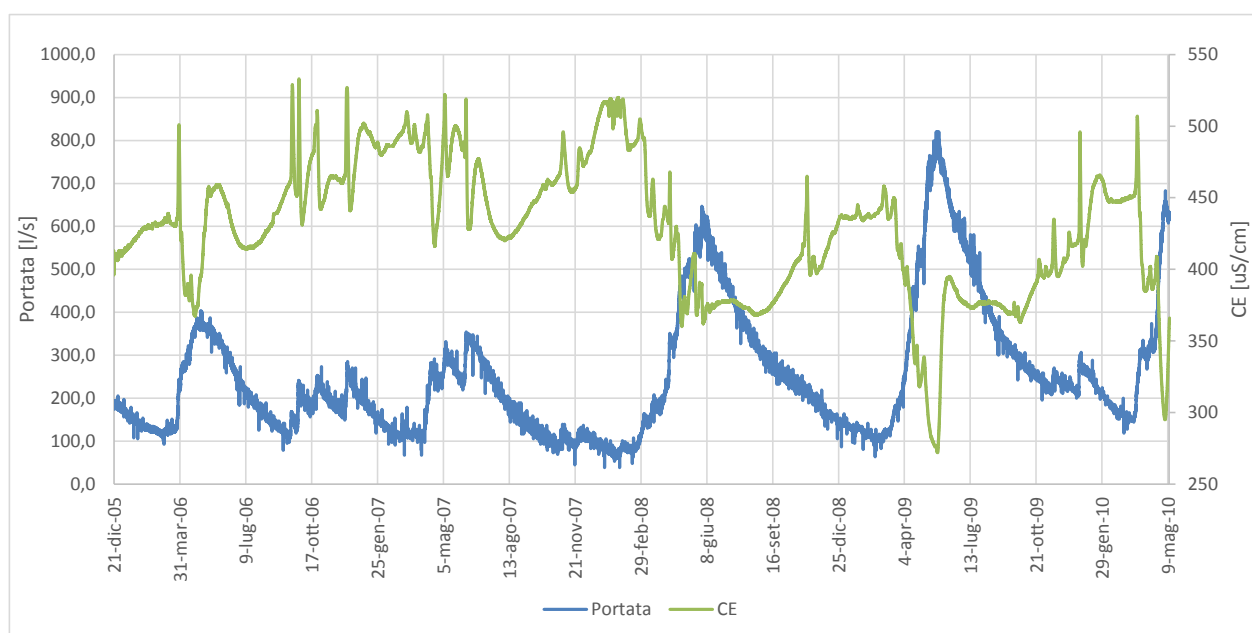


Figura 204: Andamento della portata e della conducibilità elettrica presso la sorgente del Col di Tenda

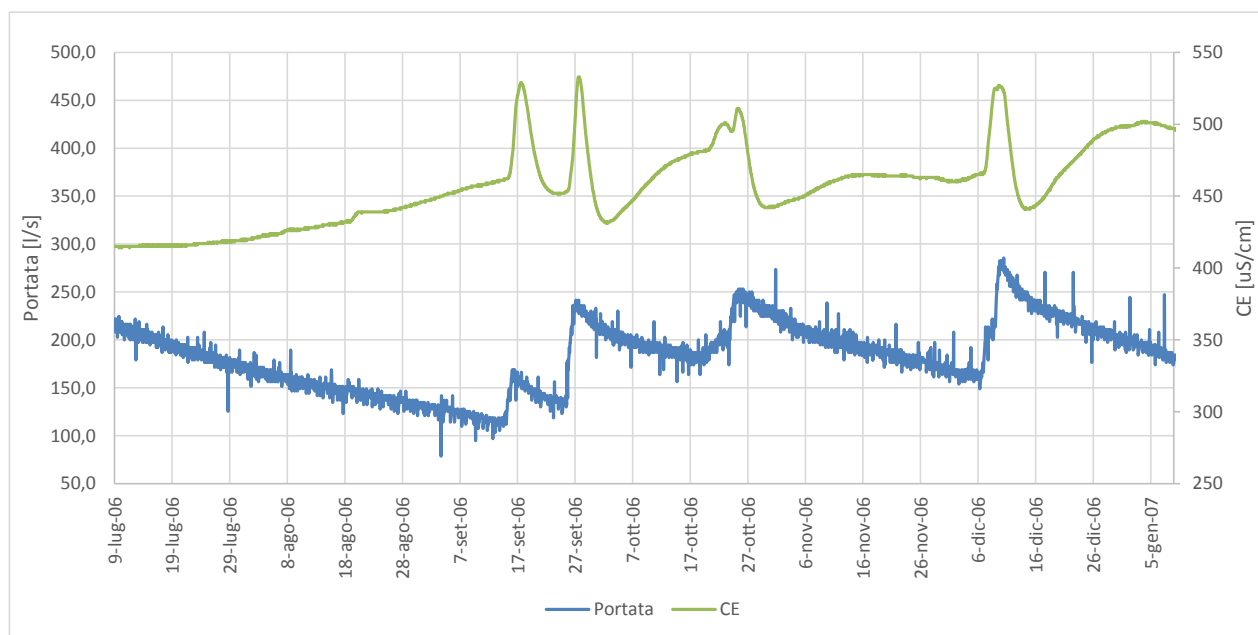


Figura 205: Dettaglio dell'andamento della portata in relazione all'andamento della conducibilità elettrica presso la sorgente del Col di Tenda

Le temperature dell'acqua si mantengono molto costanti nel tempo con una variazione massima annuale di soli 0,4°C.

Tali dati mostrano, come sia secondario l'apporto diretto delle acque di neoinfiltrazione: nel periodo primaverile, quando assume una notevole importanza il fenomeno della fusione nivale e si infiltrano acque con temperature molto basse, si assiste, alla sorgente, solo ad una blanda diminuzione dei valori che rimangono sempre al di sopra dei 7 °C (Figura 206).

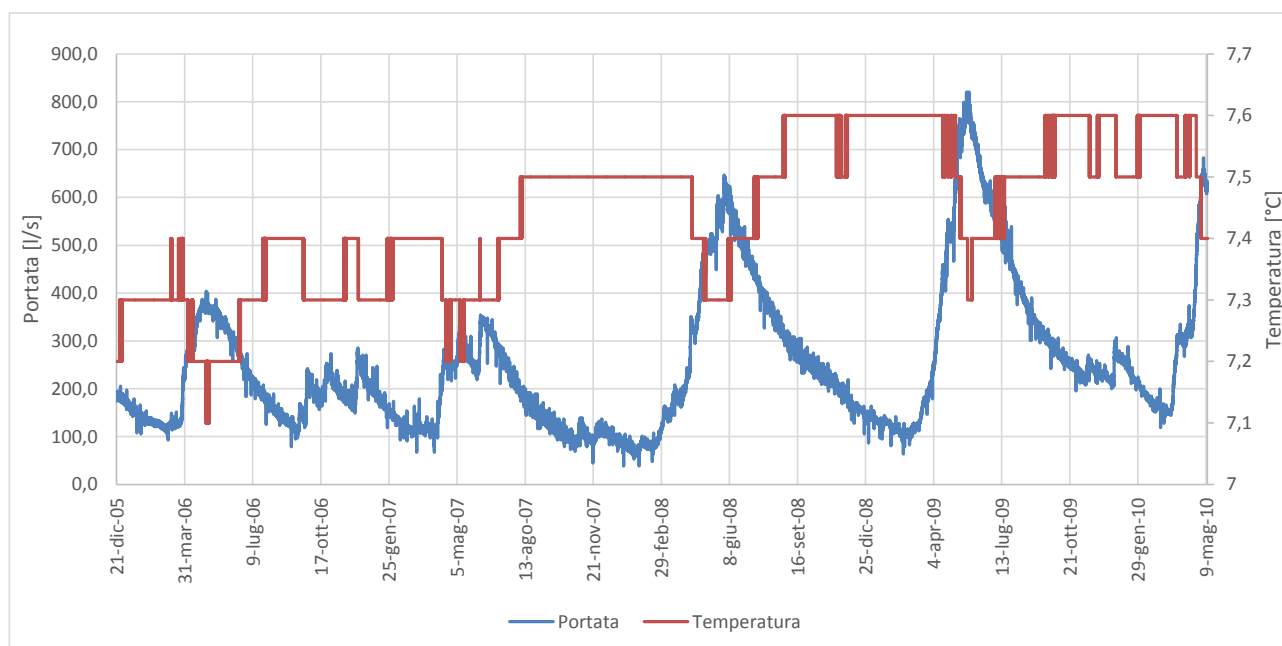


Figura 206: Andamento della portata e della temperatura presso la sorgente del Col di Tenda

8.3.3.3. COLLEGAMENTO IDRICO CON LA SORGENTE DEL TENDA

Il collegamento tra l'acquifero carsico intercettato con i sondaggi SI3 e SB e la sorgente idrocaptata del Tenda è facilmente riscontrabile dal confronto tra gli andamenti piezometrici misurati presso il piezometro SI3 e quelli misurati presso la vasca di carico dell'acquedotto (Figura 217)

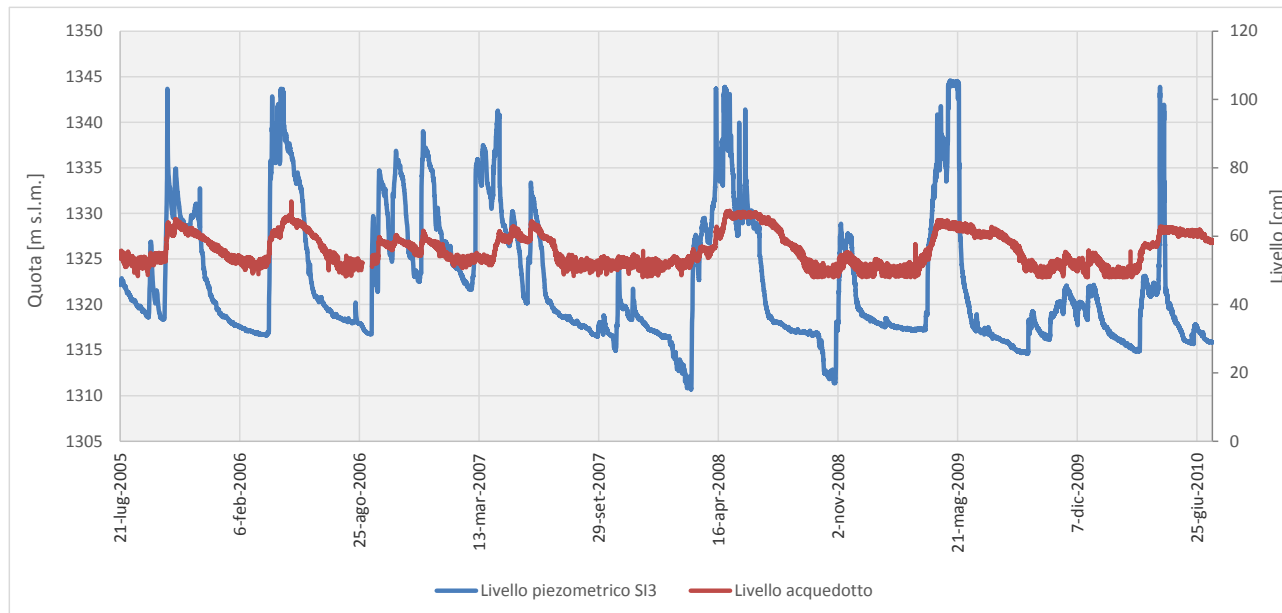


Figura 207: Confronto tra i livelli piezometrici in SI3 e i livelli idrici dell'acquedotto delle Langhe

Il grafico di Figura 208 evidenzia l'andamento dei livelli piezometrici dell'acquifero (SI3) e presso le vasche di carico dell'acquedotto in seguito ad un apporto infiltrativo: la risposta impulsiva è dovuta alla trasmissione delle pressioni idrauliche nelle fratture e nei condotti carsici a pieno carico.

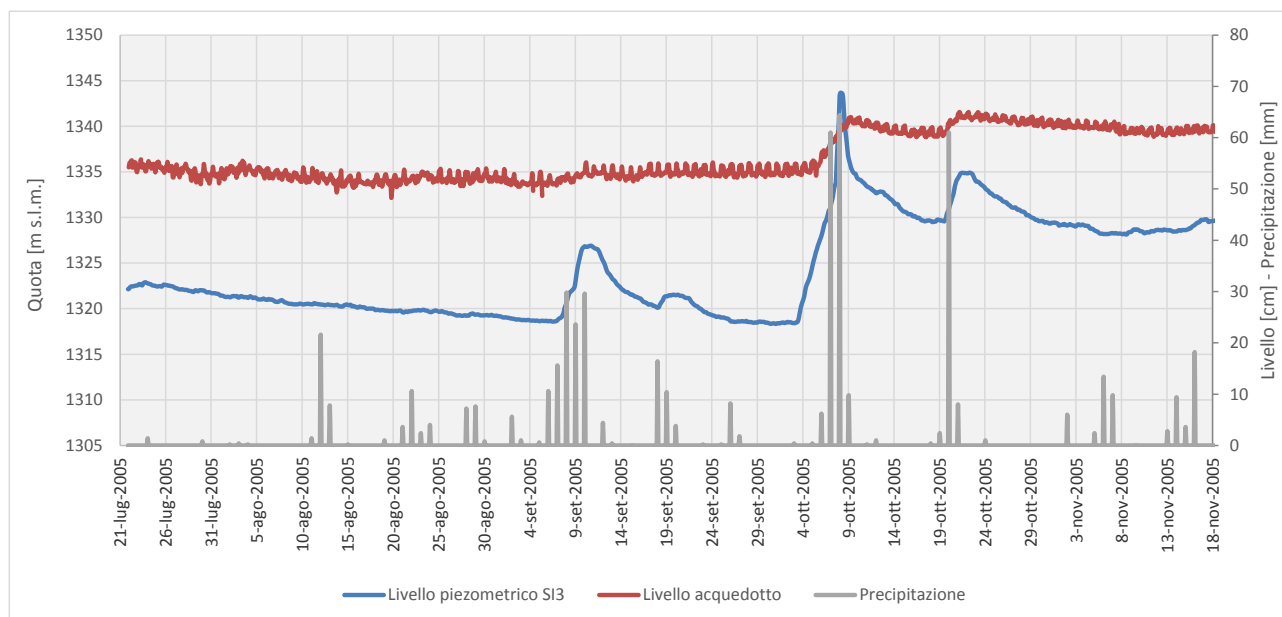


Figura 208: Dettaglio relativo alla risposta infiltrativa dei livelli idrici presso le vasche dell'acquedotto e il piezometro SI3

8.3.3.4. DEGRADO QUANTITATIVO DELLA RISORSA IDRICA

L'opera interessa solo in minima parte la porzione della zona satura dell'acquifero quindi si presuppone che il depauperamento quantitativo della risorsa idrica sarà molto ridotto.

Per una previsione della portata che potrà essere detratta da quella sorgiva dallo scavo della nuova galleria è stato applicato il modello di Goodman (1965), il quale sembra essere quello che meglio si adatta alla situazione specifica.

L'impostazione del modello si è basata sui dati noti di permeabilità media dell'ammasso ($K = 10^{-3}$ m/s) considerato come un poroso equivalente; del battente dominante (27 m); di un raggio dello scavo di 9 m per una lunghezza del tratto in acquifero pari a 254.6 m. Si ottiene una portata pari a ~24 l/s per tutto il tratto. Tali valori corrispondono grossomodo alle portate drenate dalla galleria esistente in occasione di precipitazioni particolarmente intense. Il **rischio di depauperamento della sorgente sarà quindi estremamente ridotto**, in particolare durante i periodi di magra e molto poco influente durante le piene sorgive

8.3.3.5. LE MISCELE CEMENTIZIE E IL DEGRADO QUALITATIVO DELLA RISORSA IDRICA

La necessità di interventi di miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche del terreno durante la futura realizzazione del tunnel comporterà delle iniezioni di consolidamento, ovvero l'immissione forzata di particolari miscele in grado di sostituire la parte liquida ed aeriforme del terreno con sostanze idonee ad agglutinare il materiale, migliorando le caratteristiche di resistenza meccanica (Tabella 25). Le miscele consolidanti più spesso adoperate sono quelle cementizie, maggiormente adatte in terreni o rocce con grossi vuoti.

Le miscele cementizie, una volta filtrate nelle fessure, agiscono tramite decantazione dei granuli di cemento. Tale decantazione si esplica tanto più celermente quanto più è alto il rapporto C/A (miscele instabili).

Tabella 25: Correlazione tra il tipo di miscela e la caratterizzazione dei vuoti

Tipo e dimensione di vuoti	Tipo di miscela
Vuoti liberi, origine carsica, fessure circa decimetriche	Miscele con carica ghiaiosa a base di cemento, a presa accelerata
Grosse fessure superiori al centimetro	Miscele di cemento con carica fine (ceneri, sabbia fine), a presa accelerata; miscele a base di bentonite, argilla, cemento; schiume amminoplastiche e poliuretaniche
Fessure medie (da 1 mm a 1 cm)	Miscele a base di cemento con addizione di bentonite e argilla. Schiume sintetiche; resine
Fessure sottili (da 0.5 a 1 mm)	Miscele speciali a penetrabilità migliorata; <i>gel</i> di silicato; resine acriliche
Fessure molto sottili inferiori a 0.5 mm; materiali porosi	Bentonite deflocculata; <i>gel</i> di silice a bassa viscosità; resine acriliche e fenoliche

Generalmente, per migliorare le prestazioni del cemento, ai fini del consolidamento, vengono utilizzati degli additivi.

A seconda della funzione coinvolta nel miglioramento, gli additivi possono essere classificati in vari tipi, i più importanti dei quali sono:

- acceleranti
- ritardanti
- superfluidificanti (e fluidificanti)
- aeranti

Gli additivi **acceleranti** (*accelerators*, in inglese) e quelli **ritardanti** (*retarders*, in inglese) hanno la funzione di modificare il grado di idratazione (α) del cemento solo alle brevi stagionature e modificano, quindi, le prestazioni del cemento in corso di esecuzione ma non le prestazioni delle strutture in esercizio.

Gli *acceleranti*, in particolare, fanno aumentare il grado di idratazione del cemento alle brevi stagionature in modo da accorciare i tempi di presa (**acceleranti di presa**) o di incrementare la resistenza meccanica nei primi giorni (**acceleranti di indurimento**) sopra tutto nei climi invernali quando la bassa temperatura rallenta il decorso della reazione iniziale tra l'acqua ed il cemento. Gli acceleranti non modificano la resistenza meccanica del calcestruzzo alle lunghe stagionature, cioè in servizio, e pertanto le prestazioni delle strutture in opera non risentono beneficamente della eventuale presenza di acceleranti⁶. I più comuni acceleranti sono di natura chimica e sono a base di cloruro di calcio, glicerolo, glicol etilenico, cloruro di sodio, cloruro di potassio e solfato di alluminio.

Gli *additivi ritardanti*, invece, hanno la funzione di ridurre il grado di idratazione (α) del cemento nelle prime ore, soprattutto in climi caldi quando l'alta temperatura accelera l'idratazione del cemento ostacolando il trasporto del calcestruzzo (perdita di lavorabilità), le operazioni di getto e quelle di finitura. Anche questi additivi aiutano l'impresa a risolvere qualche problema in fase esecutiva ma non modificano sostanzialmente le prestazioni del materiale in servizio.

Gli additivi aeranti (*air-entraining agents*, *AEA*, in inglese), invece, modificano le prestazioni del calcestruzzo in servizio migliorandone la resistenza al ghiaccio. Gli additivi superfluidificanti (*superplasticizers*, in inglese) ed in minor misura gli additivi fluidificanti (*plasticizers*, in inglese) modificano - a seconda del loro impiego - le prestazioni del calcestruzzo in corso di esecuzione e/o quelle in esercizio (durabilità, resistenza meccanica, ritiro, ecc.).

Questi additivi possono presentare un certo grado di pericolosità per la salute umana anche se utilizzati in concentrazioni molto basse.

Il collegamento idrico accertato tra il futuro tunnel e la sorgente di Tenda potrebbe rappresentare quindi un significativo problema in termini di qualità delle acque idrocaptate: i cementi additivati, utilizzati per il consolidamento della galleria, potrebbero raggiungere la sorgente inquinandola.

Appare dunque necessario verificare la presenza di tali additivi alla sorgente al fine di attivare delle soglie di allarme prima che l'acqua venga distribuita nella rete acquedottistica. La possibilità di eseguire campionamenti in continuo e successive analisi è da escludersi in quanto economicamente insostenibile e non tempestiva.

⁶ In passato, quando si impiegavano acceleranti a base di cloruri si sono registrati fenomeni di corrosione delle armature quando si eccedeva nel dosaggio di questi additivi.

La soluzione proposta è stata quella di **non ricercare direttamente la presenza degli additivi** in acqua ma quella di **individuare alcuni indicatori della presenza di cemento** alla sorgente, che potessero essere misurati in continuo.

Al superamento di opportune soglie di concentrazione di cemento in acqua è prevista l'attivazione di un campionatore automatico per il prelievo delle acque e la loro successiva analisi di laboratorio.

Al fine, dunque, di verificare la presenza di cemento in acqua sono stati realizzati dei test in laboratorio con lo scopo di individuare quale o quali indicatori potessero essere adottati per il monitoraggio delle acque di sorgente.

I parametri testati sono stati i seguenti:

- Conducibilità elettrica
- Torbidità
- pH

Aumentando progressivamente la concentrazione del cemento in acqua sono stati monitorati in continuo i valori dei parametri sopra elencati.

Sono stati eseguiti tre test con *range* di concentrazioni di cemento diverse e metodologia di immissione differenti:

1. range di concentrazione tra 10 mg/l e 100 mg/l con immissione di polvere di cemento in acqua
2. range di concentrazione tra 1 mg/l e 200mg/l con immissione di polvere di cemento in acqua
3. range di concentrazione tra 1 mg/l e 100 mg/l con immissione del cemento in soluzione acquosa

È importante sottolineare che l'acqua utilizzata nei test è stata campionata direttamente alla sorgente del tonda al fine di eseguire i test nelle medesime condizioni chimiche che si avrebbero alla sorgente. Le misure di pH sono state effettuate mediante una sonda portatile con misurazioni ad alta frequenza (5 – 10 min) mentre le misure di torbidità sono state realizzate mediante un torbidimetro da campo.

Il cemento è stato immesso, in polvere o in soluzione, in acqua tenuta in continuo movimento per simulare al meglio le condizioni che si avrebbero in una sorgente.

Durante il test n° 2 e n° 3 non sono state eseguite le misure di torbidità in quanto la strumentazione era guasta.

La Figura 209 mostra l'andamento della torbidità e del pH all'aumentare della concentrazione di cemento in acqua durante il primo test effettuato. Dal grafico si nota come sia il pH che la torbidità rispondano molto velocemente all'immissione di cemento in acqua.

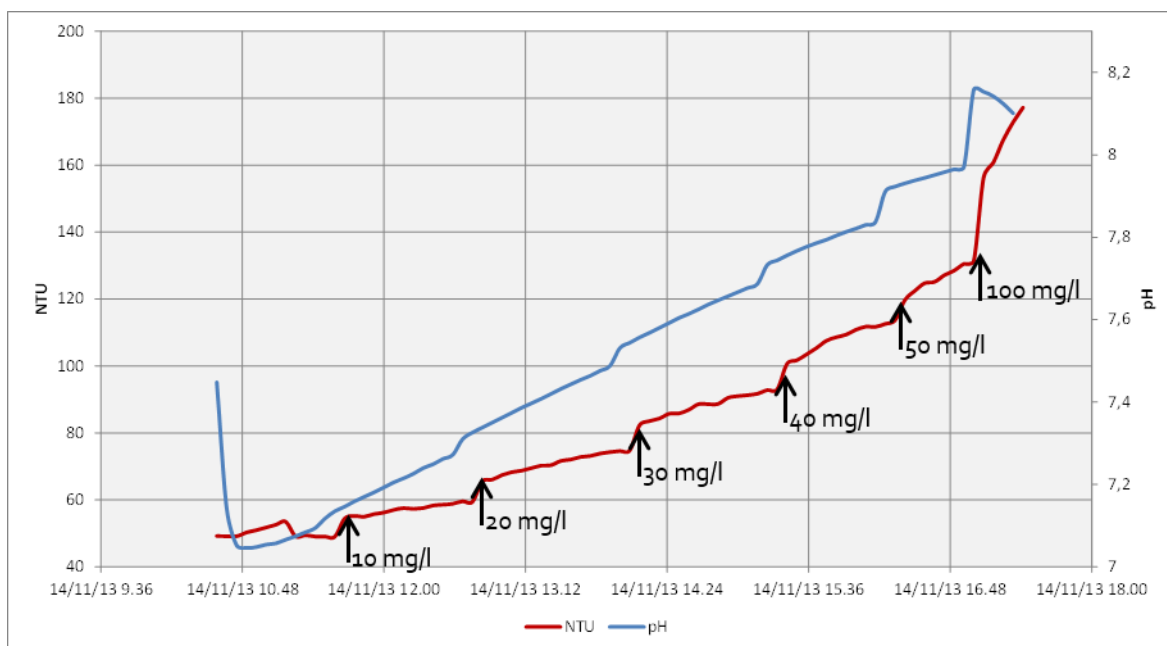


Figura 209: Andamento della torbidità e del pH al crescere della concentrazione di cemento

La Figura 210 riporta il trend del pH e della conducibilità elettrica al crescere della concentrazione di cemento durante il primo test. La conducibilità elettrica cresce all'aumento della concentrazione di cemento fino ad un pH pari a circa 8,4, punto in cui si raggiunge l'equilibrio della calcite e si ha la precipitazione del carbonato di calcio.

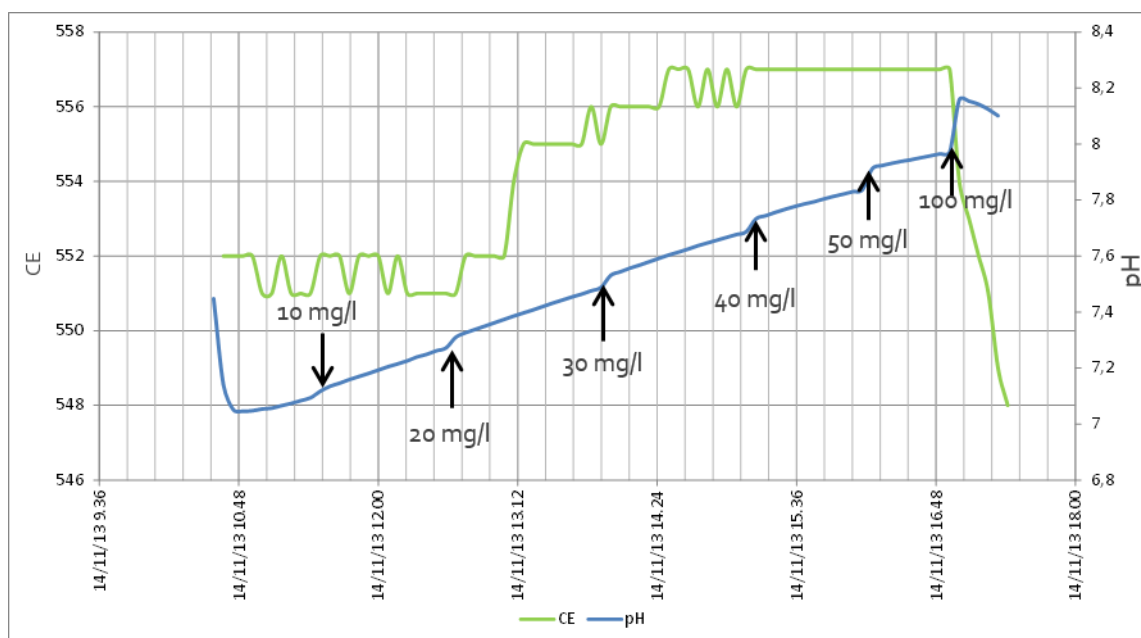


Figura 210: Andamento del pH e della conducibilità elettrica al crescere della concentrazione di cemento

Il secondo test, effettuato partendo da concentrazioni più basse di cemento in acqua, conferma i risultati del test precedente.

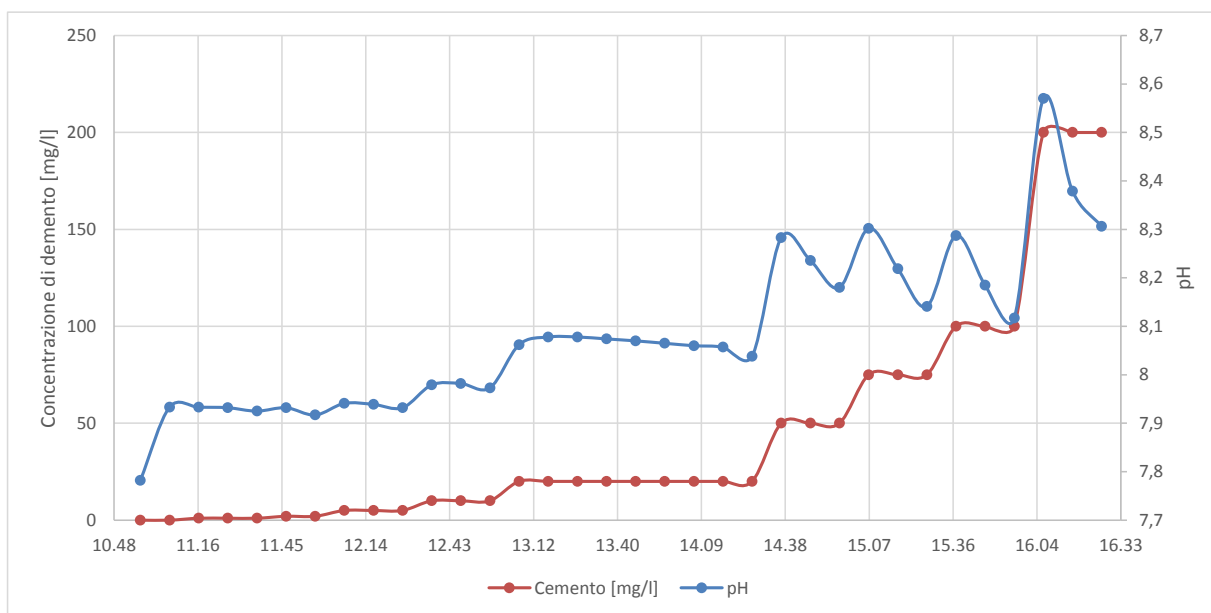


Figura 211: Andamento del pH al crescere della concentrazione di cemento

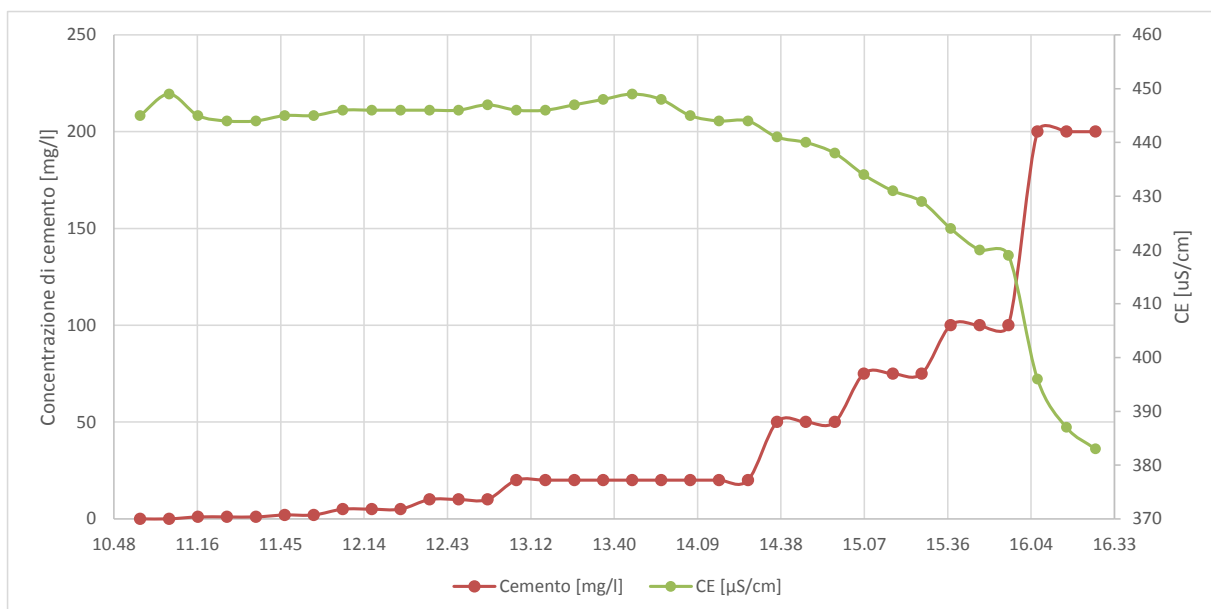


Figura 212: Andamento della conducibilità elettrica al crescere della concentrazione di cemento

Il terzo e ultimo test è quello che simula in maniera più precisa le condizioni che si avrebbero alla sorgente. In questo test infatti il cemento è stato immesso sotto forma di soluzione acquosa; tale soluzione è stata tenuta in agitazione durante l'intera durata del test. Tale operazione ha consentito di immettere una soluzione in cui tutte le reazioni chimiche acqua-cemento fossero già concluse.

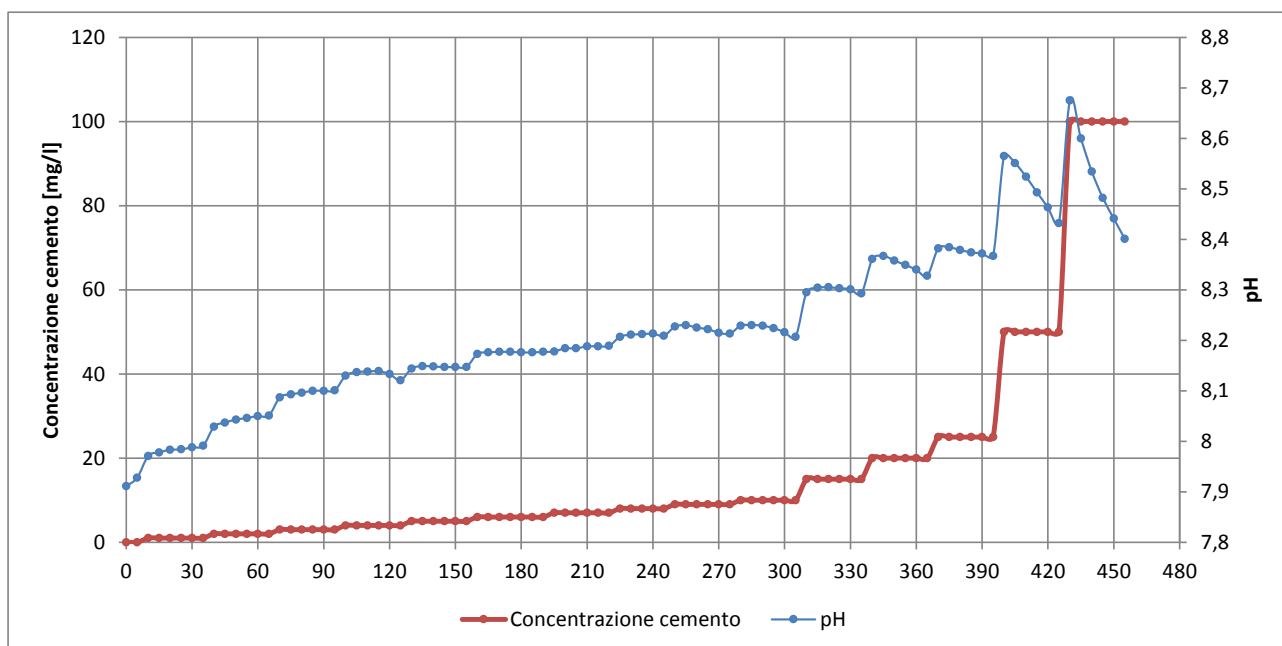


Figura 213: Andamento del pH al crescere della concentrazione di cemento

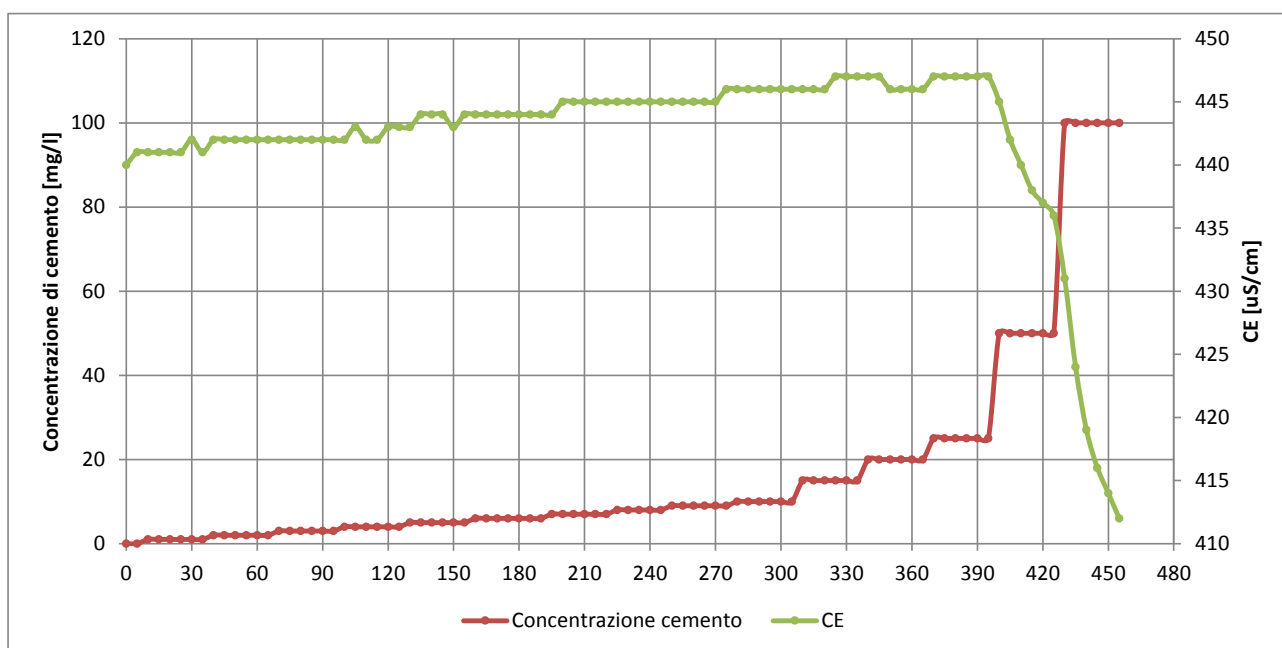


Figura 214: Andamento della conducibilità elettrica al crescere della concentrazione di cemento

Dai test svolti appare chiaro come sia la torbidità che il pH risultino essere dei buoni indicatori della presenza di cemento in acqua mentre la conducibilità elettrica, seppur sensibile alle alterazioni chimiche prodotte dall'immissione del cemento in acqua, mostra un andamento difficilmente utilizzabile per la definizione di valori soglia.

La sola torbidità che, come era presumibile, si è dimostrata un ottimo indicatore non può essere utilizzata come unico parametro per rilevare l'arrivo di cemento in acqua in quanto essa può variare anche per cause naturali. I grafici di Figura 215 e di Figura 216 evidenziano quanto appena detto. La torbidità aumenta naturalmente per intense e prolungate precipitazioni.

Per tale motivo si prevede che il valore di soglia sia sempre considerato in associazione con un parametro piuttosto costante nell'acquifero come il pH.

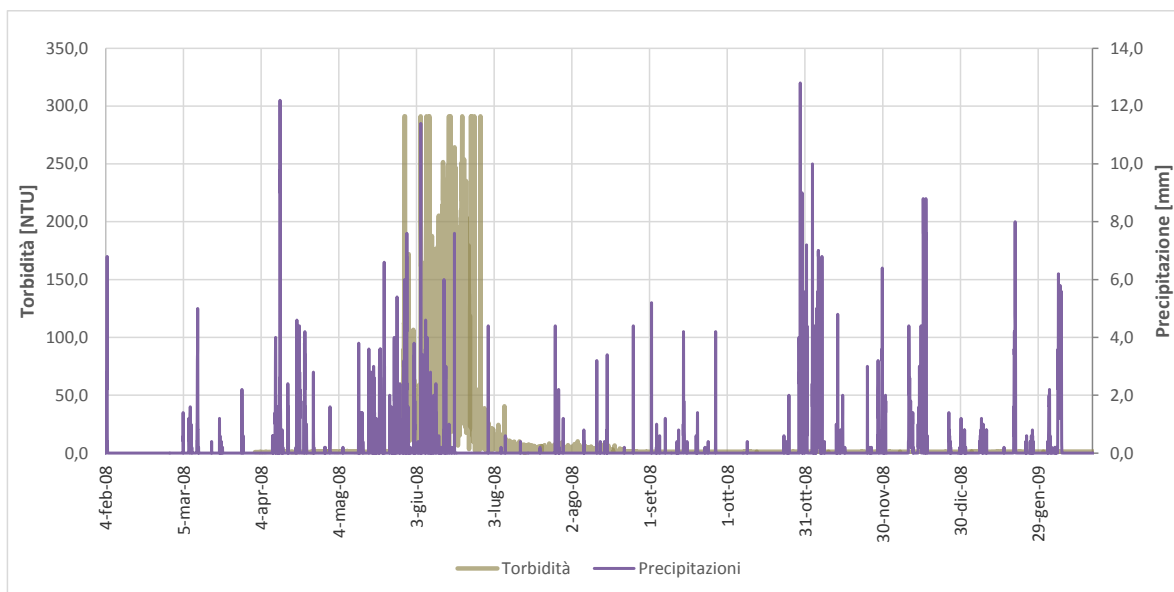


Figura 215: Andamento della torbidità in relazione agli apporti infiltrativi

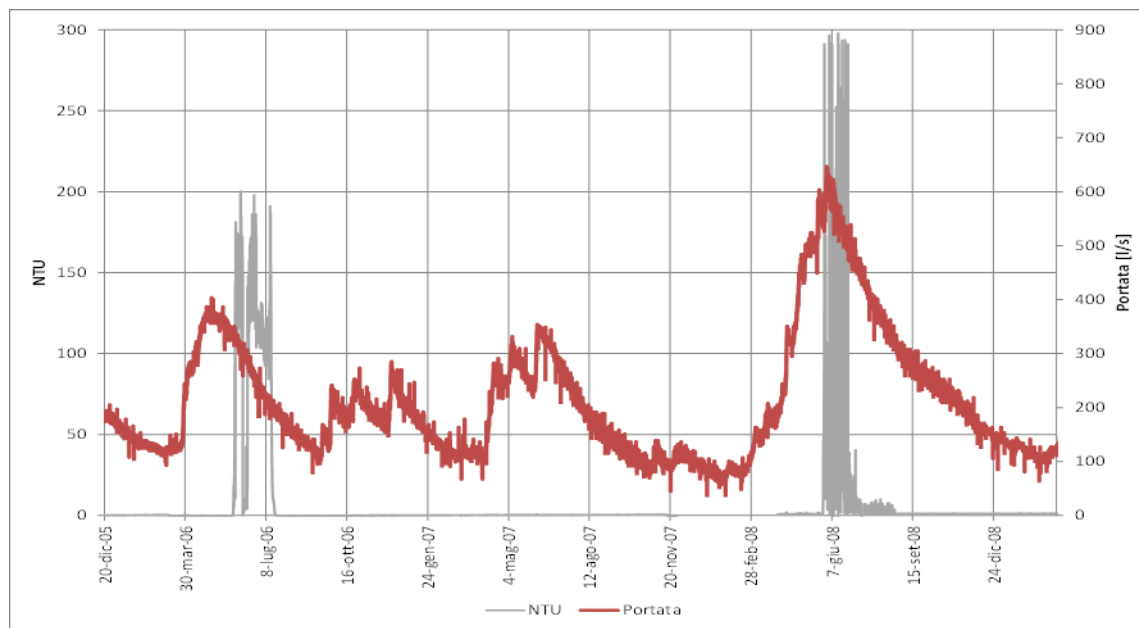


Figura 216: Andamento della torbidità al variare della portata

L'utilizzo contemporaneo di questi due indicatori (torbidità e pH) risulta essere maggiormente cautelativo e ridurrebbe il rischio di errori di interpretazione legati a variazioni dei singoli parametri di origine prettamente naturale.

La definizione dei valori soglia sarà effettuata a seguito di ulteriori analisi, soprattutto legate al valore di torbidità.

8.3.4. CONCLUSIONI E CONSIDERAZIONI GENERALI

Il caso studio descritto sottolinea alcuni aspetti cruciali nello studio delle interferenze tra acquifero e opera in sotterranea.

Il monitoraggio degli andamenti piezometrici e lo studio della risposta-chimico fisica della sorgente ha permesso di **individuare il modello idrogeologico** alla base della struttura acquifera del Col di Tenda: con riferimento al Paragrafo 7.3 esso sembra essere riconducibile ad un sistema intermedio tra il modello a moderata velocità di flusso e quello a bassa velocità di flusso.

I dati ottenuti hanno altresì consentito di **verificare l'effettivo collegamento tra l'acquifero e la sorgente** idrocaptata. Appurato tale aspetto è stato valutato il rischio di depauperamento quantitativo, risultato piuttosto basso, e il rischio qualitativo.

Inoltre la conoscenza degli andamenti piezometrici nei piezometri "afferenti" ai livelli acquiferi interessati dallo scavo permette di individuare i periodi, durante l'anno in cui lo scavo si troverà al di sotto o al di sopra della superficie piezometrica. Tale dato fondamentale, ottenuto a fronte di una spesa trascurabile rispetto al costo dell'opera stessa, permette di avere maggiori garanzie sulla sicurezza dello scavo: sia per la tutela degli operatori sia per l'avanzamento dello scavo stesso.

Senza voler entrare nel merito tecnico, risulta evidente che nelle zone maggiormente a rischio di inrush e di ingenti venute (es. zone di faglia, zone con importanti fratture carsificate, ecc) sarà importante avanzare, con lo scavo, nei periodi di magra onde evitare ingenti carichi idraulici al fronte.

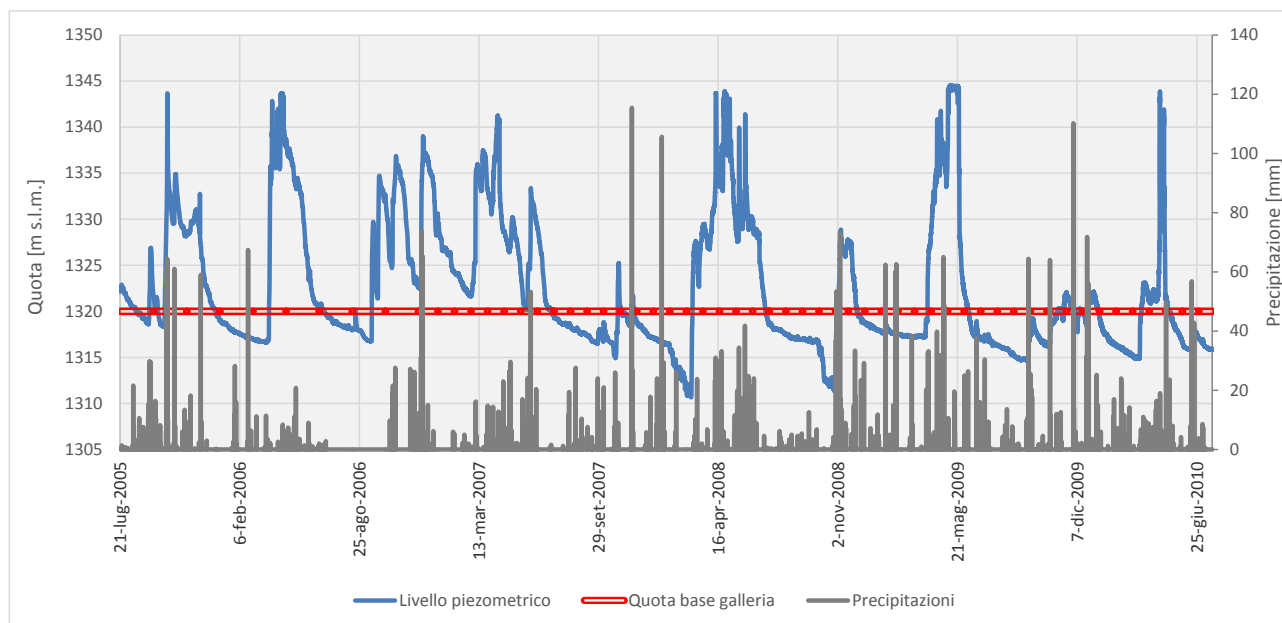


Figura 217: Andamento dei livelli piezometrici in relazione con la quota della futura galleria

Da quanto appena descritto emerge, ancora un volta, l'importanza di una **corretta configurazione del monitoraggio** alla cui base vi è una strumentazione adeguata. La Figura 218 mostra l'andamento del pH, misurato da due diverse strumentazioni, all'aumentare della concentrazione di cemento. Lo strumento 1, che presenta problemi di funzionamento e bassa risoluzione, misura un valore di pH pari a 8,3 costante nel

tempo mentre lo strumento 2, correttamente funzionante, evidenzia il crescere del pH al crescere della concentrazione di cemento.

L'utilizzo di una strumentazione inadeguata comprometterebbe completamente l'interpretazione dei dati.

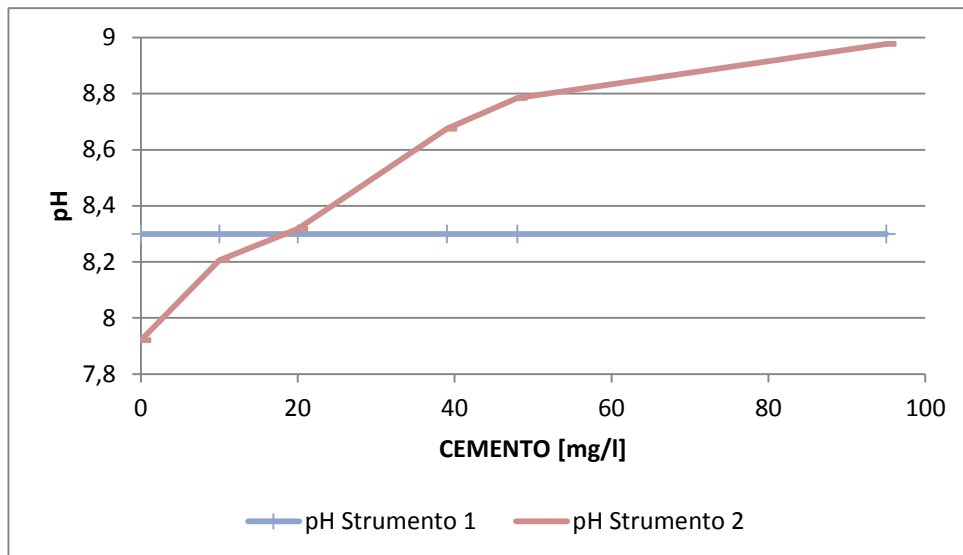


Figura 218: Confronto tra due diverse strumentazioni nella misura del pH

8.4. CASO STUDIO IN VAL SUSA

Nell'ambito dello stage aziendale presso la SEA Consulting S.r.l. svolto grazie al progetto Bando Alta Formazione, promosso dalla Regione Piemonte, sono state svolte alcune attività al fine di ottimizzare un indice di probabilità di essiccamento di punti d'acqua (sorgenti, tratti di corsi d'acqua, ecc) interessati dallo scavo di una galleria.

Tale indice di rischio ideato e sviluppato da Dematteis et al. nel 2001 e denominato DHI (Drawdown Hazard Index) è stato integrato con l'analisi dei potenziali impatti sui corsi d'acqua che intersecano il tracciato di una galleria.

8.4.1. IL METODO DHI

In questo paragrafo verrà sinteticamente descritto il metodo DHI al fine di chiarirne i concetti alla base. Tale metodo non verrà descritto in dettaglio in quanto disponibile, in versione estesa, in letteratura.

Il DHI si basa sulla Teoria dei Sistemi applicata all'ammasso roccioso, presentata da HUDSON nel 1992 con il nome di "Rock Engineering Systems" (RES) (Dematteis, Kalamaras, & Eusebio, A system approach for evaluating springs drawdown due to tunneling, 2001).

L'applicazione del metodo per la definizione del DHI si sviluppa in sei fasi:

1. definizione dello schema concettuale del sistema esaminato e descrizione dei principali meccanismi identificati, basandosi sul modello idrogeologico di riferimento;
2. definizione delle variabili del sistema, del loro intervallo di applicazione e della variabile risultante del sistema, rappresentata dal potenziale di drenaggio che la galleria ha sulle sorgenti e/o sui corsi d'acqua (PI);
3. descrizione e quantificazione delle relazioni di causa - effetto fra ciascuna coppia di variabili e costruzione della matrice d'interazione binaria (BIM);
4. definizione dei meccanismi globali del sistema e costruzione della matrice d'interazione globale (GIM). La GIM riflette l'effetto globale che la variazione di una variabile ha sul sistema.
5. Valutazione della risposta del sistema al variare dei valori delle variabili
6. Back-analysis di casi reali, taratura del sistema e introduzione dei fattori di aggiustamento per la determinazione del DHI.

Il sistema acquifero – galleria viene rappresentato da 8 variabili, che sono in relazione con il fenomeno di abbassamento della falda e dell'isterilimento delle sorgenti.

- Frequenza di fratturazione (FF)
- Permeabilità del massiccio (MK)
- Spessore della copertura (OV)
- Ampiezza della zona plastica (PZ)
- Distanza dal tunnel (DT)
- Intersezione con zone di faglia o carsiche (IF)

- Tipo di sorgente (TS)
- Effetto topografico (ET)

Ad ognuna delle variabili sopra elencate viene attribuito un peso secondo la tabella riportata di seguito.

Codice	Descrizione	Valore numerico
FF	Frequenza di fratturazione	1 = faglie principali e/o zone di fratturazione; 0,8 = faglie minori; 0,1 = assenza
MK	Permeabilità del massiccio	0,9 = permeabilità alta; 0,75 = permeabilità medio - alta; 0,5 = permeabilità media; 0,25 = permeabilità medio - bassa; 0,1 = permeabilità bassa
OV	Spessore della copertura	0,9 = copertura < 50m; 0,5 = 50 < copertura < 100; 0,2 = 100 < copertura < 500; 0,1 = copertura > 500
PZ	Estensione della zona plastica	1 = raggio zona plastica > 2 raggio galleria; 0 = raggio zona plastica < 2 raggio galleria
DT	Distanza di tunnel	1,9 = dist. ass. < 200m; 1,5 = 200m < dist. ass. < 500m; 1,2 = 500m < dist. ass. < 1000m; 1,1 = dist. ass. > 1000m; 0 = dist. ass. > 5000m
IF	Intersezione con faglie maggiori	2 = intersezione con faglie che tagliano la galleria; 1 = nessuna intersezione
TS	Tipo di sorgente	2 = sorgente profonda (alimentata dal substrato roccioso); 1,5 = sorgente mista; 1 = sorgente superficiale (legata solo a depositi quaternari)
ET	Effetto Topografico	2 = dist. vert. > 0 e stesso versante; 1,5 = dist. vert. > 0 e stesso versante o dist. vert. < 0 e altro versante; 1 = dist. vert. < 0 e altro versante

Definite le variabili fondamentali del sistema esaminato (x) il *Fully-Coupled Model* (FCM) prevede, come passo successivo, la determinazione di tutte le relazioni dirette intercorrenti fra esse. Trattandosi di relazioni dirette, il meccanismo attraverso il quale x_i influenza x_j ha la forma:

$$x_j = f_{ij}(x_i) \quad \text{se } i \neq j$$

$$x_i = x_j \quad \text{se } i = j$$

Viceversa, l'influenza di x_i su x_j è determinata dalla derivata parziale di $x_j = f_{ij}(x_i)$ rispetto a x_i . Riportando tutte le relazioni dirette su una matrice si ottiene la BIM (Binary Interaction Matrix), all'interno della quale il termine f_{ij} rappresenta l'influenza diretta che la variabile x_i ha rispetto alla variabile x_j :

0	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}
f_{21}	0	f_{23}	f_{24}	f_{25}
f_{31}	f_{32}	0	f_{34}	f_{35}
f_{41}	f_{42}	f_{43}	0	f_{45}
f_{51}	f_{52}	f_{53}	f_{54}	0

Binary Interaction Matrix

Se l'interazione fra variabili è espressa da una relazione lineare i coefficienti della BIM sono delle costanti.

In questa prima fase del metodo si assume che ciascuna variabile non influenzi sé stessa (i termini sulla diagonale della BIM sono sempre nulli) in quanto si stanno considerando solo relazioni binarie. La BIM descrive infatti la struttura matematica fondamentale del sistema e contiene solo le relazioni dirette fra variabili. Il passo successivo è quindi quello di stabilire come queste relazioni binarie operano congiuntamente.

Nel caso particolare del sistema acquifero - galleria i meccanismi con cui le variabili fondamentali interagiscono direttamente fra loro possono essere schematicamente rappresentati come nella Figura 219: Esempificazione concettuale della matrice del sistema acquifero - galleria.

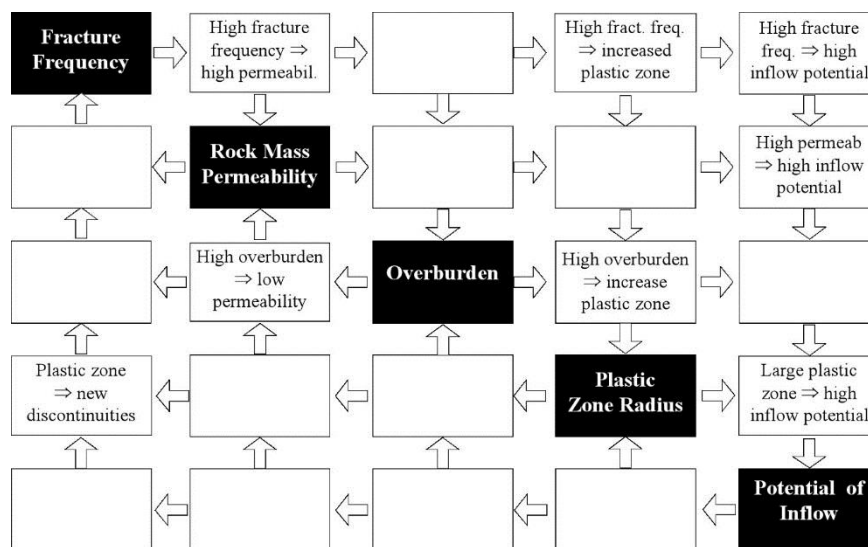


Figura 219: Esempificazione concettuale della matrice del sistema acquifero - galleria

Tale rappresentazione considera solo 4 delle 8 variabili precedentemente definite, in particolare considera le variabili che si riferiscono alle caratteristiche dell'acquifero e che concorrono a determinarne il *drenaggio potenziale (PI)* ovvero FF, MK, OV e PZ. Le relazioni dirette che interessano tali variabili e il PI possono essere raccolte in una matrice del tipo seguente:

0	f_{12}	0	f_{14}	f_{15}
0	0	0	0	f_{25}
0	f_{32}	0	f_{34}	0
f_{41}	0	0	0	f_{45}
0	0	0	0	0

Forma della BIM riferita al sistema acquifero – galleria

Le quattro variabili di sistema escluse dalle considerazioni precedenti (DT, IF, TS, ET) sono state diversamente considerate nel metodo, come verrà mostrato nel seguito.

Anche se in generale le relazioni che legano due variabili fondamentali del sistema acquifero - galleria non sono lineari, esse possono essere in prima ipotesi linearizzate in modo da consentire l'applicazione del *Full Couplet Model* anche a tale contesto. Assegnando quindi dei pesi alle iterazioni descritte qualitativamente nella tabella precedente è stata ottenuta la BIM del sistema acquifero – galleria, mostrata nella tabella seguente.

0	0,8	0	0,5	0,5
0	0	0	0	0,8
0	0,3	0	0,5	0
0,3	0	0	0	0,3
0	0	0	0	0

Pesi della BIM riferita al sistema acquifero - galleria

I processi che si verificano all'interno del sistema acquifero - galleria sono più complessi di quanto rappresentato dalle interazioni dirette fra le variabili fondamentali che lo costituiscono. E' necessario, infatti, tenere in considerazione che le perturbazioni si trasmettono da una variabile all'altra mediante meccanismi concatenati che coinvolgono l'intero sistema.

Per rappresentare adeguatamente tali meccanismi può essere utilizzata la GIM (Global Interaction Matrix) costruita a partire dalla BIM considerando tutti i possibili percorsi con cui una perturbazione può propagarsi all'interno del sistema. La GIM è costituita dai coefficienti G_{ij} che rappresentano l'interazione globale (cioè che si manifesta indirettamente anche attraverso le altre variabili) fra le variabili x_i e x_j e che vengono calcolati a partire dai coefficienti f_{ij} della BIM.

Il concetto di "percorso" può essere adeguatamente rappresentato mediante grafi che collegano le variabili fra le quali sussiste una relazione binaria e che sono orientati coerentemente con il verso della relazione stessa. Nella Figura 220 è mostrato il grafo per il sistema in esame.

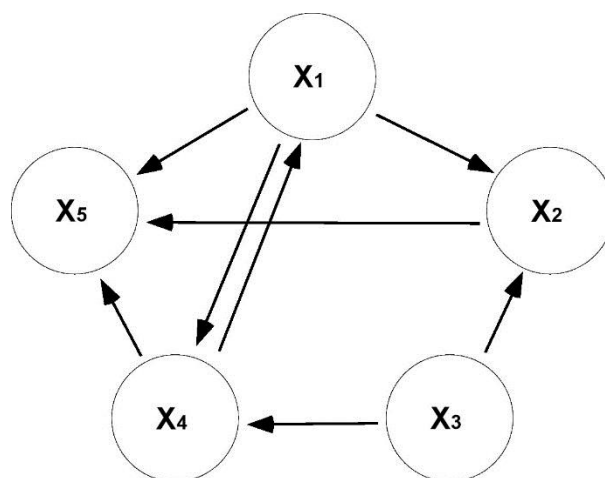


Figura 220: Rappresentazione mediante grafi del sistema acquifero - galleria

A titolo di esempio si riporta nel seguito la procedura adottata per la determinazione di G_{45} . I possibili percorsi per andare dalla variabile 4 alla variabile 5 seguendo le direzioni fornite dai grafi sono i seguenti:

- percorso diretto 4 – 5 (rappresentato dal coefficiente BIM f_{45})
- percorso attraverso la variabile 1 (rappresentato dai coefficienti BIM f_{41} ed f_{15})
- percorso attraverso le variabili 1 e 2 (rappresentato dai coefficienti BIM f_{41} , f_{12} e f_{25}).

Nell'effettuare tale tipo di valutazione è necessario tenere in considerazione gli eventuali percorsi circolari che determinano il ritorno alla variabile di partenza; nel caso considerato è possibile solo il percorso circolare fra le variabili 1 e 4 (rappresentato dai coefficienti BIM f_{14} ed f_{41}).

L'espressione di G_{45} è quindi la seguente:

$$G_{45} = (f_{45} + f_{41} * f_{15} + f_{41} * f_{12} * f_{25}) / (1 - f_{14} * f_{41})$$

La procedura di calcolo da adottare per gli altri coefficienti GIM non appartenenti alla diagonale è la medesima:

$$G_{12} = f_{12} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{13} = 0$$

$$G_{14} = f_{14} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{15} = (f_{15} + f_{14} * f_{45} + f_{12} * f_{25}) / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{21} = 0$$

$$G_{23} = 0$$

$$G_{24} = 0$$

$$G_{25} = f_{25}$$

$$G_{31} = f_{34} * f_{41} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{32} = f_{32} + (f_{34} * f_{41} * f_{12}) / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{34} = f_{34} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{35} = f_{32} f_{25} + (f_{34} * f_{45} + f_{34} * f_{41} * f_{15} + f_{34} * f_{41} * f_{12} * f_{25}) / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{41} = f_{41} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{42} = f_{41} * f_{12} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{43} = 0$$

$$G_{51} = 0$$

$$G_{52} = 0$$

$$G_{53} = 0$$

$$G_{54} = 0$$

I coefficienti appartenenti alla diagonale della GIM possono essere calcolati mediante una procedura analoga che considera tutti i possibili percorsi circolari a partire da ciascuna delle variabili:

$$G_{11} = 1 + f_{14} * f_{41} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

$$G_{22} = 1$$

$$G_{33} = 1$$

$$G_{44} = 1 + f_{41} * f_{14} / (1 - f_{14} * f_{41})$$

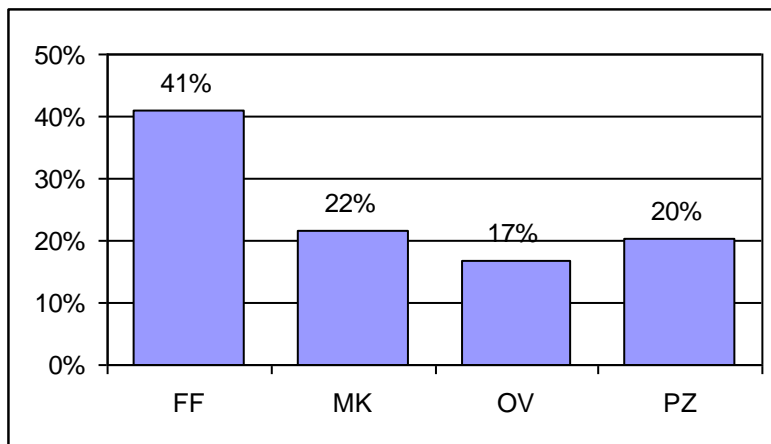
$$G_{55} = 1$$

Tale metodologia, applicata alla BIM precedentemente determinata, ha fornito il seguente risultato (GIM):

1,2	0,9	0	0,6	1,5
0	1	0	0	0,8
0,2	0,4	1	0,6	0,6
0,4	0,3	0	1,2	0,8
0	0	0	0	1

Global Interaction Matrix

La quinta colonna della GIM definisce il peso che le variabili del sistema (FF, MK, OV, PZ) hanno nei confronti del potenziale di drenaggio della galleria (PI). Normalizzando i valori ottenuti nella GIM è possibile determinare il peso percentuale (P_i) di ciascuna variabile (V_i) nei confronti del potenziale di drenaggio PI. Nella figura seguente è mostrato il grafico dei pesi percentuali (P_i) di ciascuna variabile.



Valutazione dei pesi delle variabili del sistema sulla variabile PI, in base al risultato della GIM

PI può quindi essere espresso come $PI = (P_1V_1 + P_2V_2 + P_3V_3 + P_4V_4) / 100$, ossia, nel caso specifico:

$$PI = (41*FF + 22*MK + 17*OV + 20*PZ) / 100$$

Al fine di definire l'indice di probabilità di isterilimento della sorgente (DHI) è necessario tenere in considerazione gli altri quattro fattori già introdotti in precedenza: la distanza dal tunnel (DT), l'intersezione con faglie maggiori (IF), il tipo di sorgente (ST) e l'effetto topografico (ET).

Questi fattori chiave, detti fattori chiave, prendono in considerazione tutte quelle condizioni al contorno che possono essere determinanti nella valutazione della probabilità di inaridimento di una

sorgente; a prescindere dal contesto idrogeologico medio del massiccio alla quota della galleria (valutato tramite l'indice PI).

A differenza delle precedenti variabili considerate, i fattori chiave non presentano interazioni tra loro, sono variabili indipendenti. Per questo motivo non sono stati inclusi nella matrice del PI.

La definizione di questi fattori è riportata nella Tabella 26. Come si vede questi fattori hanno una variabilità compresa tra 1 e 2, essendo 1 il caso di influenza minima a o nulla e 2 quello di influenza massima.

L'indice di probabilità di isterilimento (DHI) espresso in percentuale è il prodotto del potenziale di drenaggio (PI) per i fattori chiave, normalizzato rispetto al suo valore massimo:

$$DHI = PI * IF * ST * DT * ET * 100 / DHI_{max}$$

Il DHI_{max} , che si ottiene nella condizione teorica di più alta probabilità di isterilimento della sorgente (FF = 1, MK = 0,9, OV = 0,9, PZ = 1, DT = 1,9, IF = 2, TS = 2, ET = 2) è pari a 1461.

La previsione dell'isterilimento delle sorgenti analizzate per ciascun tracciato è stata infine espressa mediante quattro gradi, come riportato nella tabella seguente.

Tabella 26: Gradi di probabilità di isterilimento delle sorgenti

Classe	DHIndex	Probabilità di occorrenza
1	$0 < DHI \leq 0,16$	trascurabile
2	$0,16 < DHI \leq 0,24$	bassa
3	$DHI > 0,24$	elevata

Tabella 27: Priorità di azione per mitigare il rischio di isterilimento delle sorgenti

Classe	Priorità	Azione
1	nessuna	Nessuna azione richiesta
2	elevata	Progettazione delle misure di mitigazione
3	assoluta	Progettazione e realizzazione delle misure di mitigazione prima dell'inizio degli scavi

8.4.2. AREA DI STUDIO E MISURE IN SITU

Al fine di adattare tale metodologia, concepita solamente per lo studio delle sorgenti, anche ai corsi d'acqua superficiali è stata individuata un'area di studio per la calibrazione del DHI "riadattato".

L'area di studio è ubicata in alta Val Susa e comprende i seguenti corsi d'acqua superficiali:

- Torrente Clarea
- Torrente Cenischia

- Rio Supita
- Rio Giandula

Per la realizzazione del calcolo dell'indice di probabilità di inaridimento dei corsi d'acqua, ogni corso d'acqua deve essere suddiviso in tratti omogenei da un punto di vista idrogeologico.

Per fare ciò sono state compiute numerose misure manuali di conducibilità elettrica e temperatura con una spaziatura di circa 150 m o comunque ove possibile l'accesso all'alveo del torrente sui corsi d'acqua sopra elencati (Figura 221).

Nei grafici riportati di seguito (Figura 222, Figura 223, Figura 224, e Figura 225) si vedono gli andamenti della conducibilità e della temperatura dei diversi corpi d'acqua presi in esame.

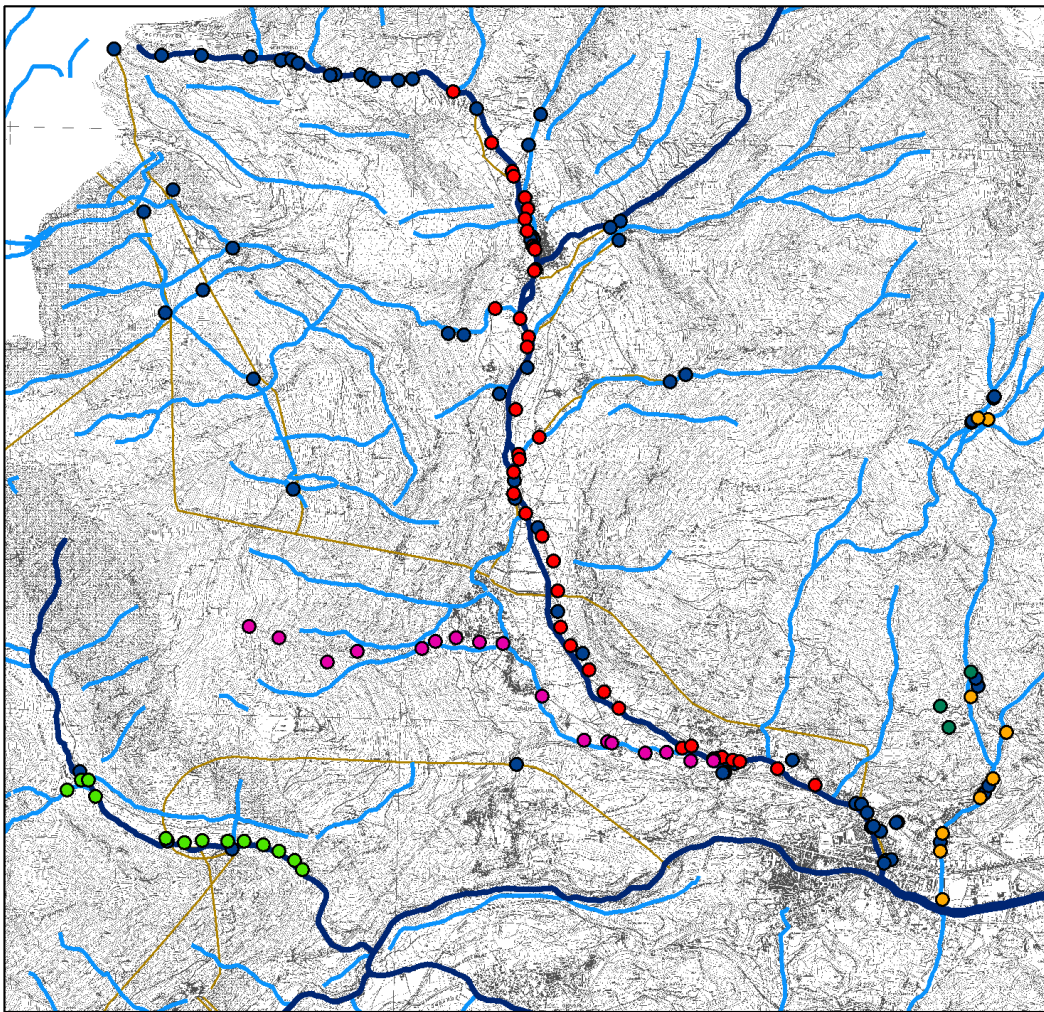


Figura 221: Punti in cui sono state eseguite le misure di CE e T sui diversi torrenti